

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Merenkulku / Merenkulun Insinööri

Jukka Lajunen

HUKKALÄMMÖN TALTEENOTTO JA HYÖTYKÄYTTÖ

Opinnäytetyö 2015

# TIIVISTELMÄ

## KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

### Merenkulku

LAJUNEN, JUKKA

Opinnäytetyö

Työn ohjaaja

Toimeksiantaja

Maaliskuu 2015

Avainsanat

Hukkalämmön talteenotto ja hyötykäyttö

40 sivua + 3 liitesivua

Lehtori Ari Helle

Kymi Technologies

hukkalämpö, hyötykäyttö, WHRS

Nykyajan vaatimukset energiatehokkuudesta ovat johtaneet siihen, että hukkalämpöä on ruvettu käyttämään laivoilla sähköntuotantoon. WHR-järjestelmillä eli hukkalämmön talteenottolaitteilla (engl. Waste Heat Recovery) kyetään korvaamaan ajon aikana dieselgeneraattoreilla tuotettua sähköä ja näin alentamaan aluksen polttoaineenkulu- tusta.

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin hukkalämmön käyttöön sähköntuotannossa. Työs- sä käsitellään nykyään käytössä olevia WHR-laitteita sekä perehdytään uusiin vaihto- ehtoihin, joilla järjestelmiä voidaan toteuttaa. Työn tarkoituksena on myös tarjota suomenkielistä tietoa järjestelmistä.

WHR-järjestelmillä voidaan kokoonpanosta riippuen tuottaa sähköä 3 - 11 % aluksen pääkoneen tehosta. Järjestelmät myös alentavat meriajossa aluksen tuottamia kasvi- huonepäästöjä, kun perinteisesti dieselgeneraattorilla tuotettu sähkö korvataan WHRS:n tuottamalla sähköllä. Järjestelmillä on saavutettavissa kilpailuetua verratessa aluksiin, joilla järjestelmää ei ole. Optimitilanteissa voidaan laitteistolla alentaa aluk- sen käyttökuluja yli 2 miljoonalla dollarilla vuodessa.

WHR-järjestelmiä käytetään jo laajalti voimalaitoksissa sekä muissa teollisuuden lai- toksissa. Lähitulevaisuudessa on odotettavissa järjestelmien käytön laajenevan laivoil- la, johtuen vallalla olevasta kustannustehokkuusajattelusta sekä tarpeesta vähentää alusten tuottamia päästöjä.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Degree Programme in Marine Technology

LAJUNEN, JUKKA

Waste Heat Recovery and Utilization

Bachelor's Thesis

40 pages + 3 pages of appendices

Supervisor

Ari Helle, Senior Lecturer

Commissioned by

Kymi Technologies

March 2015

Keywords

Whrs, Waste heat, Recovery, Utilization

This thesis examines different alternatives to utilize waste heat for the production of electricity. Shipping industry as a whole is searching for methods of lowering emissions produced from ships. As the laws of thermodynamics dictates, combustion engines will always produce waste heat as a by-product.

The main objective for this thesis was to produce compact information package for seafarers in Finnish. The Secondary objective was to examine new alternatives for commonly used steam cycles. Attempts to request information and interviews directly from manufacturers were made but there was little interest from their behalf.

As a result, the waste heat recovery systems were found to be viable options to reduce emissions and at the same time produce electricity for ships. As the demand for more fuel efficient operating for ships rises, it is safe to predict that these systems will become more popular. Especially, if the price for bunker oil significantly rises in the future. However in the future there will be viable alternatives for steam cycles, one being Organic Rankine Cycle that uses silicon based oils as a medium.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO	7
2	HUKKALÄMPÖ	8
2.1	Hukkalämpö käsitteenä	8
2.2	Polttomoottoreiden lämpöhäviöt	8
2.3	Hukkalämmön hyötykäyttö	10
3	WHRS-LAITTEISTOT	10
3.1	Laitteistojen kehittymisen historiaa	10
3.2	WHRS yleisesti	11
3.2.1	Pakokaasuturbiini ja generaattori	13
3.2.2	Höyryturbiini ja generaattori	14
3.2.3	Höyry- ja pakokaasuturbiini ja generaattori	16
3.3	Kehitteillä olevia laitteistoja ja tulevaisuuden visioita	17
3.3.1	Echogen	17
3.3.2	ORC (Organic Rankine Cycle)	18
3.3.3	Kalina	19
3.4	Järjestelmien vaikutus aluksen vakavuuteen	20
4	LAITTEISTOJEN TOIMINTA JA KÄYTTÖ	21
4.1	Pakokaasuturbiini ja generaattori	21
4.2	Höyryturbiini ja generaattori	23
4.3	Höyry- ja pakokaasuturbiini ja generaattori	26
5	WHRS:SSÄ TUOTETTU SÄHKÖENERGIA	28
6	LUOKITUSLAITOKSEN SÄÄNNÖKSET	29
7	LAITTEIDEN VAIKUTUS LAIVAN TALOUDELLISUUTEEN	30
7.1	Polttoaineen kulutus	30

7.2	Päästöjen väheneminen sekä EEDI	33
7.3	Takaisinmaksuaika	34
8	SOVELTUVUUS ERI ALUSTYYPEILLE	35
8.1	Rahtilaivakäytössä	35
8.2	Matkustaja-aluskäytössä	36
9	YHTEENVETO	37
	LÄHTEET	39
	LIITTEET	
	Liite 1: Piirustukset laitekokonaisuuksista	

## KÄSITELUETTELO

EEDI	Energy Efficiency Design Index Energiatehokkuusindeksi
PTG	Power turbine and generator Pakokaasuturbiini ja generaattori
STG	Steam turbine and generator Höyryturbiini ja generaattori
ST-PT	Steam turbine, power turbine and generator Höyryturbiini, pakokaasuturbiini ja generaattori
WHR	Waste Heat Recovery Hukkalämmön talteenotto
WHRS	Waste Heat Recovery Systems Hukkalämmön talteenottojärjestelmät

## 1 JOHDANTO

Valitsin kyseisen aiheen, kun selailin laitevalmistajien tuoteluetteloita ja löysin WHRS-järjestelmät. Pidin aihetta kiinnostavana ja suomenkielistä informaatiota aiheesta etsiessäni totesin, että sitä oli tarjolla niukasti ja merenkulun näkökulmasta katsottuna oli tietoa saatavilla sitäkin vähemmän. Työni tarkoituksena on antaa muillekin aiheesta kiinnostuneille tietoa suomeksi.

Työn edetessä törmäsin sellaiseen ongelmaan, että laitevalmistajat eivät mielellään jakele tarkkoja tietoja järjestelmistään. Tiedä sitten onko syynä se, että laitteet ovat suhteellisen uusi asia merenkulussa ja halutaan varjella omia innovaatioita vai siitä, että en ollut heidän silmissään potentiaalinen asiakas.

Nykyajan taloudellisuuteen ja vähäpäästöisyyteen pyrkivä yhteiskunta on innoittanut laivakoneistojen valmistajia kehittämään hukkalämmön hyötykäyttöön soveltuvia laitteita. Työssäni pyrin tuomaan esille kyseisten laitteiden etuja nykyisiin konekonseptihin verrattuna, sekä järjestelmistä syntyviä säästöjä pitkällä aikavälillä. Pyrin myös avaamaan kuinka laitejärjestelmiä suunnitellaan aluksen tarpeisiin sopivaksi. Tuon esille myös muutamia kehitteillä olevia laitekokonaisuuksia, joita todennäköisesti tul-  
laan näkemään käytössä lähitulevaisuudessa.

Työssäni käytin tietolähteinä merenkulkualan sekä voimalaitostekniikan julkaisuja. Useat voimalaitoksissa olevat tekniikat on siirrettävissä merenkulkuun, kun pidetään mielessä, että laivojen konehuoneet ovat käytännössä pieniä voimalaitoksia. Lisäksi lähdetietoina käytin laitevalmistajien laitemanuaaleja, erinäisten tahojen suorittamia tutkimuksia sekä koulussa että työn ohessa karttuneita tietoja.

## 2 HUKKALÄMPÖ

### 2.1 Hukkalämpö käsitteenä

Hukkalämpö (engl. Waste Heat) on lämpöä, jota syntyy esimerkiksi polttoaineen palautuksessa tai kemiallisessa reaktiossa. Hukkalämpö käsitetään yleisesti ottaen mekaanisen työn tai sähköntuotannon sivutuotteena. Monille järjestelmille on termodynamiikan lakien mukaan välttämätöntä tuottaa lämpöä varsinaisen työnsä ohella. Yleisiä hukkalämmön lähteitä ovat voimalaitokset, erilaiset ajoneuvot, öljynjalostus, terästeollisuus.

Arkisessa elämässä hukkalämpö ilmenee hyvin esimerkiksi, kun omakotitaloa lämmitetään takalla. Poltettava puu sisältää paljon energiaa, poltettaessa puun sisältämä energia muuttuu lämpöenergiaksi, josta osa säteilee takasta talon sisälle ja osa energiasta poistuu hukkalämpönä savukaasujen mukana. Laivoilla hukkalämpö tulee hyvin ilmi mentäessä konehuoneeseen. Laivan pakoputkistot säteilevät lämpöä voimakkaasti vaikka ne ovat eristettyjä. Kylmällä ilmalla säteilylämpö lämmittää konehuonetiloja, jolloin niiden lämmittämiseen ei tarvitse niin paljon energiaa. Kesällä tai trooppisilla alueilla tilanne on päinvastainen: suuren hukkalämmön määrän takia täytyy aluksen konehuonetta jäähdyttää ilmastointilaitteiden avulla.

### 2.2 Polttomoottoreiden lämpöhäviöt

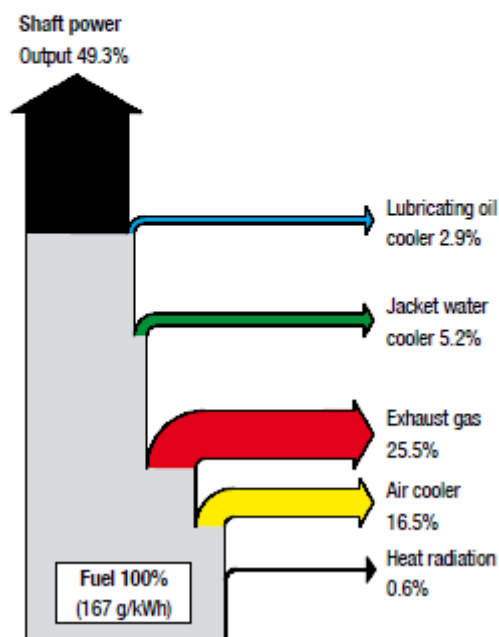
Modernit laivamoottorit ovat kehitystyön tuloksena saavuttaneet hyötysuhteen, jossa polttoaineen sisältämästä energiasta saadaan hyödynnettyä noin 50 prosenttia. Loput 50 prosenttia polttoaineen energiasta menetetään lämpöhäviöinä.



Prosentuaalisesti polttomoottorien lämpöhäviöt jakautuvat seuraavasti (1):

- Pakokaasut 25,5 %
- Huuhteluilman jäähdytys 16,5 %
- Jäähdytysvesi 5,2 %
- Voiteluöljy 2,9 %
- Lämpösäteily 0,6 %

12S90ME-C9.2 standard engine  
SMCR: 69,720 kW at 84 rpm  
ISO ambient reference conditions



Kuva 1. Sankey-diagrammi polttomoottorin lämpöhäviöistä. (1)

Lämpöhäviöitä tarkastellessa on helppo todeta, että pakokaasuja syntyy runsaasti ja sen sisältämä lämpö- sekä liike-energia ovat houkuttelevia kohteita sähköntuotannon kannalta. Pakokaasujen sisältämä lämpöenergia on lämmönvaihtimien avulla muutettavissa höyryksi ja sitä kautta mekaaniseksi liikkeeksi pyörittämään turbiinia. Pakokaasujen massavirta on jo itsessään liike-energiaa ja tämä liike-energia on helposti

hyödynnettävissä turbiinin avulla. WHR-järjestelmissä käytetyillä pakokaasukattiloilla kyetään tuottamaan höyryä noin 40 kuutiota tunnissa. Esimerkiksi suomalaiset kuluttavat ihmistä kohdin keskimäärin 56 kuutiota vuodessa, tämän vesimäärän höyrystämiseen kuluisi aikaa noin puolitoista tuntia.

### 2.3 Hukkalämmön hyötykäyttö

Hukkalämmön hyötykäytössä (engl. Waste Heat Recovery) pyritään käyttämään polttomoottoreista syntyvä hyödyntämätön lämpöenergia. Mitä paremmin saadaan polttoaineen sisältämä energia hyödynnettyä, sitä vähemmän aluksella kuluu polttoainetta, tämän seurauksena myös aluksen tuottamat päästöt pienenevät. Tehokkaampi aluksen operointi antaa kilpailuetua muihin laivoihin verrattuna, operointikulujen ollessa pienemmät voi rahdeista veloitettavaa hintaa alentaa.

Yleisimpiä tapoja hukkalämmön hyötykäytölle ovat tähän asti olleet pakokaasukattilat, joilla on tuotettu lisähöyryä kuluttajille sekä käyttöveden lämmitykseen. Toinen yleinen käyttötapana on laivamoottorin korkeanlämmön jäähdytysvesipiiriin liitetyt makeanveden kehittimet eli evaporaattorit. Hieman uudempaa teknologiaa laivakäytössä edustaa WHR-järjestelmät. Järjestelmissä käytetään ensisijaisesti pakokaasujen sisältämää lämpöenergiaa, mutta myös huuhteluilman jäähdytyksessä muodostunutta lämpöenergiaa on mahdollista käyttää hyödyksi ORC- sekä hiilidioksidijärjestelmissä

## 3 WHRS-LAITTEISTOT

### 3.1 Laitteistojen kehittymisen historiaa

Ensiaskleet hukkalämmön käytössä otti amerikkalaissyntyinen Maynard Rakestraw Linn 1930-luvulla kehittämällään pakokaasutoimisella höyrykattilalla (2). Höyrykattilaa käytettiin dieselmootoreiden tuottaman pakokaasun hyödyntämisessä. Ensimmäistä laitetta käytettiin tuottamaan lämmintä vettä yleiseen käyttöön (3). Toisen maailmansodan jälkeen laitteistoa kehitettiin käyttämään myös dieselmootoreissa käytettävän jäähdytysvedenlämpöä. Jäähdytysvedenlämpöä ruvettiin käyttämään evaporaattoreissa. Ensimmäiset WHRS-laitteet, joilla oli tarkoituksena tuottaa sähköä, näkivät päivänsä 40-luvun loppupuolella (4). 1940- ja 1950-luvun taitteessa. Gustav Pielstick

kehitti WHRS-laitteiston, jolla oli tarkoituksena lisätä aluksen pääkoneen tuottamaa akselitehoa. Laitteistossa oli höyrytoiminen turbiini, joka oli asennettu pääkoneen vaapaaseen päähän, turbiininakseli kytkettiin kampiakseliin (5).

Nyky aikaisten laitteiden kehitys alkoi 1970-luvun alun öljykriisin aikana. Raakaöljyn hinnan lähes nelinkertaistuessa nousivat myös polttoaineiden hinnat. Varustamot sekä laitevalmistajat havahtuivat siihen että polttoaineen energiasta on pystyttävä hyödyntämään entistä suurempi osa. Ensimmäiset uudempaa tekniikkaa edustavat prototyypit olivat koeajossa 1970-luvun loppupuolella. Laitteiden kehittäminen kuitenkin loppui muutamaksi vuodeksi öljykriisin laannuttua. Tanskalainen varustamo jatkoi laitteiden kehitystä itsenäisesti 1980-luvun alussa. Ensimmäiset laitteet pääsivät koekäyttöön Maerskin suuriin konttilaivoihin. Sen aikaisella tekniikalla ei kuitenkaan saatu nykypäivän laitteiden tuottamaa tehoa, vaikkakin sen aikaiset polttomoottorit synnyttivät enemmän hukkalämpöä. Prototyypeistä saadulla kokemuksella Maersk kehitti laitteistoja vastaamaan yhtiön omia vaatimuksia. Tietävästi ensimmäinen laivasarja, johon tuli uudisrakennuksena WHR-järjestelmä, on Maerskin M-luokan konttilaivat, jotka rakennettiin 1980- ja 1990-luvun taitteessa.(6) Menestyksellisen tuotekehittelyn johdosta muutkin valmistajat sekä varustamot näkivät, että polttomoottorin lämpöhäviöissä on potentiaalia sähköntuotantoon ja sitä kautta taloudellisempaan alusten opeointiin. Monet laitevalmistajat tarjoavatkin nykyään WHR-laitteistoja. Nykypäivänä monet valmistustelakat tarjoavat alustyyppisiä, joissa on optiona WHR-järjestelmä. Laitteille on nykyään suurta kysyntää. Kysynnästä esimerkkinä Mitsubishi Heavy Industriesin lanseeratessa oman versionsa WHRS-laitteistosta uudisrakennuksiin, tilattiin lanseerausvuonna 38 uutta konttilaivaa WHRS-järjestelmällä. (7)

### 3.2 WHRS yleisesti

WHR eli Waste Heat Recovery System on suunniteltu hyödyntämään polttomoottorin savukaasujen sisältämää lämpö- ja liike-energiaa muuntamalla sen sähköksi. Ajatuksena kyseinen menetelmä ei ole mitenkään uusi, mutta nykypäivänä erilaiset vaatimukset energiatehokkuudesta ja ympäristöystävällisyydestä ovat ajaneet teollisuutta kehittämään tapoja käyttää suurempi osa polttoaineen sisältämästä energiasta. Myös laitevalmistajien kilpailu on kiihdyttänyt järjestelmien kehitystä, jokaisen yrittäessä

saada kehitettyä järjestelmiä, joissa hukkalämpöä saataisiin hyödynnettyä järkevästi ja kustannustehokkaasti ja näin saamaan selkeää kilpailuetua muihin verrattuna.

Savukaasun sisältämää energiaa on näihin päiviin asti käytetty lähinnä lisähöyryn tuottamiseen pakokaasukattiloiden avulla. Aiemmin ei ole ollut tarvetta tai kiinnostusta kehittää laitteita, joilla energiaa voisi käyttää suuremmin hyödyksi. Syynä lienee merenkulkualan konservatiivinen luonne, jossa uuden teknologian käyttöönotossa ollaan oltu varovaisia.

WHRS-järjestelmät eivät ole niin sanotusti valmiita paketteja, vaan paketit kasataan tilaajan yksilöllisten tarpeiden mukaan. Useat valmistajat tarjoavat palveluita, joissa tilaajan kanssa käydään läpi tämän tarpeet sähköntuotannolle, sekä kohdealuksen toimintaan liittyviä tekijöitä kuten liikennealue, ovatko rahdit säännöllisiä vai epäsäännöllisiä. Huomioitavaa on myös, että laitteisto on sovitettava aluksen muuhun konekonseptiin sekä myös järjestelmän mahdollinen vaikutus propulsiolaitteisiin, sillä WHRS-järjestelmillä on mahdollista lisätä alusten propulsiotehoa. Näillä tiedoilla laiteitoimittajat kokoavat räätälöidyn paketin tilaajalle, joka saa sen arvioitavaksi. Laitteiston suunnittelu on helpompaa uuden aluksen kohdalla, sillä silloin on helpompi luoda tilaa laitteistolle jo suunnitteluvaiheessa.

Alla olevassa taulukossa on esimerkkinä MAN B&W:n eri laitteistokokonaisuuksien prosentuaaliset sähköntuotantomäärät. Määrät ovat prosentteja pääkoneen taikka koneiden nimellistehosta.

<b>Waste Heat Recovery Systems</b>	
	<b>Max. electrical recovery %</b>
TCS – PTG:	3 to 5
STG – Single pressure system:	4 to 7
STG – Dual pressure system:	5 to 8
Full WHRS (ST - PT):	8 to 11
All depending of engine type, size and rating	

Kuva 2. Taulukko järjestelmien teoreettisista sähköntuotanto määristä, MAN B&W (1)

Seuraavissa kappaleissa käsitellään kolmen yleisimmin käytössä olevan WHRS-järjestelmän kokoonpanot.

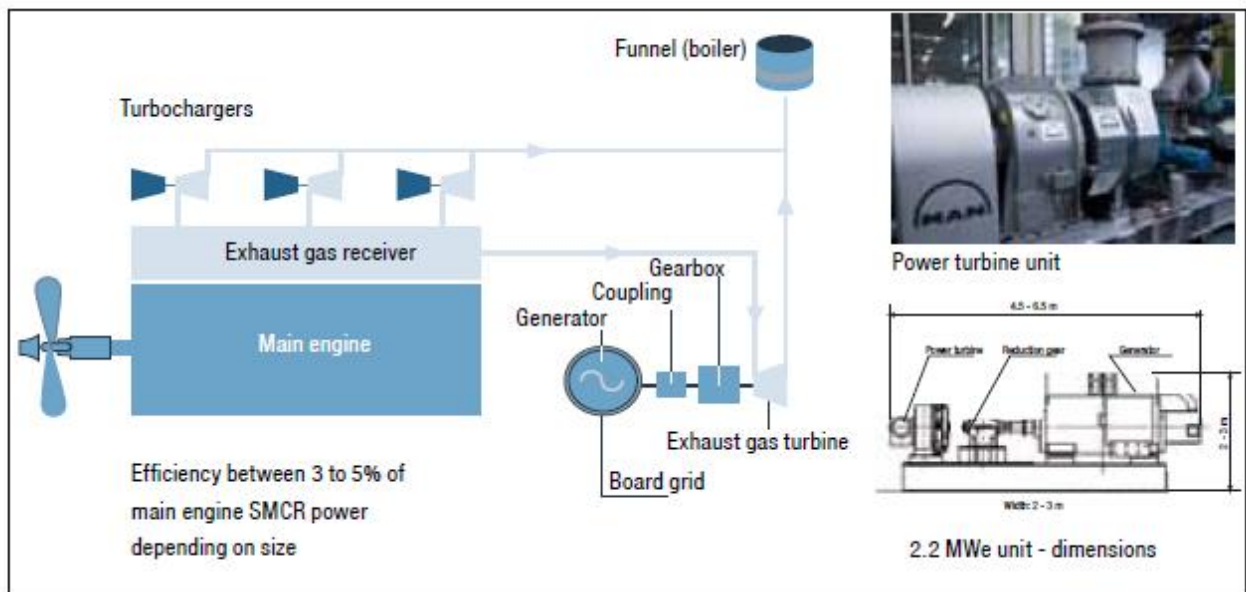
### 3.2.1 Pakokaasuturbiini ja generaattori

Laitteistoista yksinkertaisin on perinteinen kaasunvirtauksella toimiva turbiini-generaattori yhdistelmä. Järjestelmä koostuu turbiinista, pakokaasukanavaan tehdystä väliottokanavasta, alennusvaihteesta generaattorin ja turbiinin välillä, generaattorilla tuotetun sähköön verkkoon viennissä tarvittavat komponentit sekä yksilöllisen määrän putkea ja venttiileitä, joiden määrä riippuu kussakin aluksessa käytettävissä olevista tiloista sekä laitteiden välisistä etäisyyksistä. Lisäksi tulee laitteiden ympärille jäädä tilaa tulevia huoltotöitä varten. (1.)

Järjestelmä on koottu moduulirakenteiseen konejalustaan. Tätä rakennetta havainnollistava kuva löytyy liitteestä 1. Moduulirakenne helpottaa järjestelmän paikalleen asennusta. Vaikkakin laitteisto on helposti siirreltävässä, saattaa sen asentamiseen liittyä ongelmia ahtaiden konehuonetilojen takia. Pakokaasuturbiini olisi suotuista asentaa mahdollisimman lähelle pääkonetta. Mitä lähemmäksi koneikko saadaan asennettua, sitä paremmin saadaan pakokaasun sisältämä lämpö- sekä liike-energia valjastettua

sähköntuotantoon. Lyhyillä putkilinjauksilla ei pakokaasun paine putoa merkittävästi ja näin pakokaasun virtaus ei pienene merkittävästi ennen turbiinia. (8)

Pakokaasuturbiinin ja generaattorin yhdistelmällä saadaan pakokaasusta tuotettua sähköä laivan tarpeisiin noin 3 - 5 prosenttia pääkoneen tuottamasta tehosta. Sähköä saadaan tuotettua turbiininpyörimisellä. Turbiinin akseli kytketään alennusvaihteeseen ja alennusvaihte taas kytkeytyy roottorin akseliin. Alla olevassa kuvassa on esitettynä konsepti helposti ymmärrettävässä kaaviokuvassa.



Kuva 3. Pakokaasuturbiini ja generaattori. (1)

### 3.2.2 Höyryturbiini ja generaattori

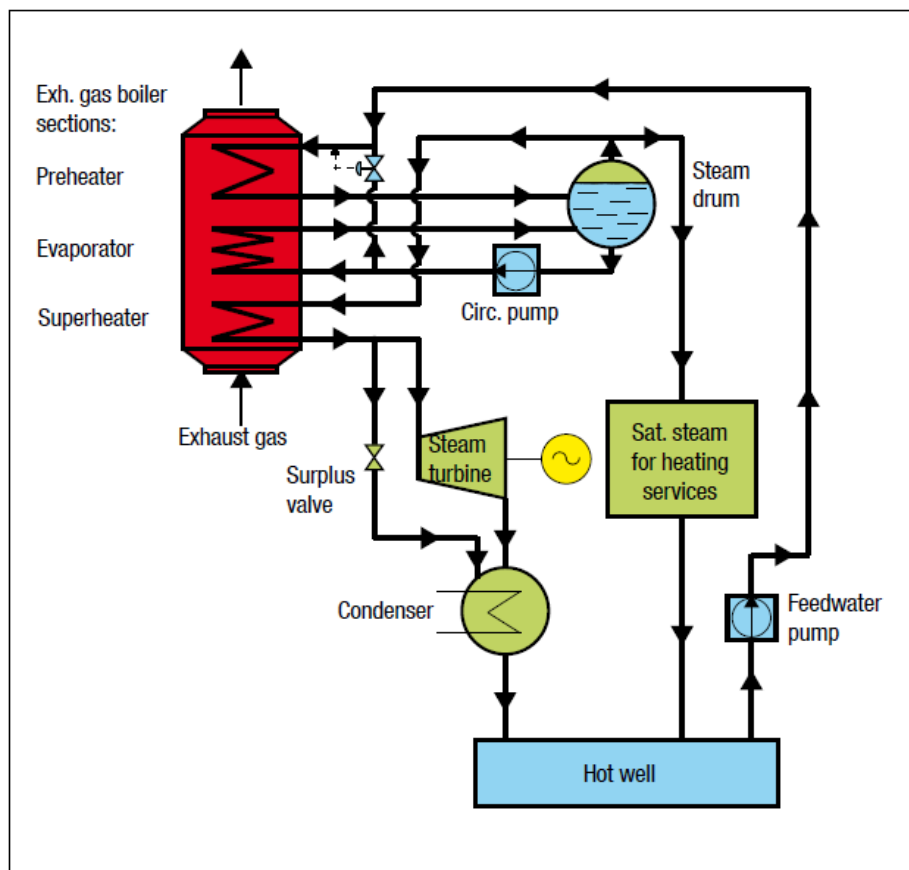
Höyryturbiinijärjestelmä vaatii laitteistonsa puolesta enemmän tilaa kuin pakokaasuturbiini, mutta sillä on taas vastaavasti hieman enemmän pelivaraa sijoittelun suhteen. Järjestelmä on myös huomattavasti monimutkaisempi verrattuna pakokaasuturbiiniin.

Yksinkertaisimmillaan järjestelmä pitää sisällään pakokaasukattilan, joka jaetaan kolmeen vaiheeseen: esilämmitin, höyrystin, tulistin. Lisäksi järjestelmään kuuluu syöttövesisäiliö, syöttövesipumppu, kierrätyspumppu, höyrylieriö, höyryturbiini, generaattori, ohitusventtiili, jäähdytin, lämpötila- sekä virtausantureita ja järjestelmän hallintapaneeli. (1)

Järjestelmä on mahdollista toteuttaa yhdellä painetasolla tai matala- ja korkeapaineisena. Kahdella painetasolla laitteiston määrä, koko sekä hinta kasvaa ja vaadittavaa tilaa voi olla vaikeampi löytää. Väliaineena höyryjärjestelmissä voidaan käyttää tislattua vettä tai vaihtoehtoisesti veden ja orgaanisen aineksen sekoitusta tai pelkkää orgaanista öljyä.

Orgaanisilla väliaineilla pyritään saavuttamaan matalampi höyrystymislämpötila, jonka avulla saadaan tuotettua tulistettua höyryä matalammissa lämpötiloissa.

Yhdellä painetasolla toimivasta koneikosta saadaan tuotettua sähkötehoa 3-5 prosenttia pääkoneen tehosta. Kahden painetason järjestelmällä saadaan tuotettua sähkötehoa noin 5-8 prosenttia pääkoneen tehosta. (1)



Kuva 3. Yhden painetason höyryjärjestelmä. (1)

### 3.2.3 Höyry- ja pakokaasuturbiini ja generaattori

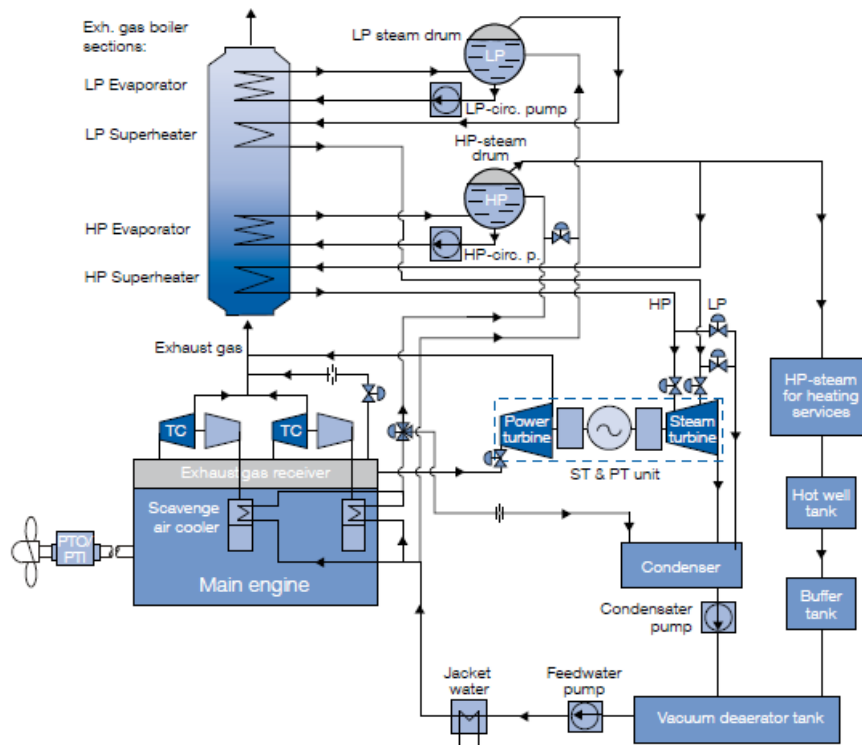
Höyry- ja pakokaasuturbiinin yhdistelmässä laitteisto on kokoonpantu yhtenäiseksi paketiksi jalustalle kuten muutkin, tämä kokoonpano vie eniten tilaa ja on jälleen ongelmallinen sijoitettava konehuoneeseen suuresta koostaan sekä pakokaasuturbiinista johtuvista syistä.

Järjestelmässä yhdistetään komponentteja sekä pakokaasu- että höyryturbiinijärjestelmistä. Järjestelmän ohjainlogiikka on aiempia järjestelmiä monimutkaisempi.

Suuresta koostaan ja suuremmista hankintakustannuksista huolimatta järjestelmällä on etuja muihin järjestelmiin verrattuna. Höyryturbiinilla voidaan aloittaa sähköntuotanto, kun pääkoneen kuorma saavuttaa ennalta määrätyn pisteen, yleisesti tämä piste mikä on noin 30 % pääkoneen kuormasta, ja kun pääkoneen kuorma on noin 40 - 50 prosenttia, voidaan tuottaa sähköä pakokaasuturbiinilla. Voidaankin siis todeta, että yhdistämällä sekä höyry- että pakokaasuturbiini saadaan hukkalämpöä käytettyä tehokkaasti läpi koneiden kuormitusalueen. (1;8)

Kombinaatiossa on yleisesti suosittu kahden painetason höyryturbiinijärjestelmää. Kahdella painetasolla saadaan järjestelmästä puristettua irti vielä muutama prosentti enemmän tehoa kuin yhdellä painetasolla.





Kuva 4. Kaksipaineinen höyry- pakokaasu kombinaatio (1)

### 3.3 Kehitteillä olevia laitteistoja ja tulevaisuuden visioita

#### 3.3.1 Echogen

Kehitteillä on Echogen Power Systems -yhtiön toimesta Echogen-nimellä kulkeva höyryturbiinijärjestelmä, jonka toimintaperiaate sähköenergian tuottamiseen on hyvin samankaltainen kuin höyryturbiinilla. Suurin ero perinteiseen vesihöyryjärjestelmään nähden on väliaine, ja väliaineena kyseisessä järjestelmässä käytetään nestemäistä CO<sub>2</sub>:a. Ensimmäinen prototyyppi valmistui 2008 ja sillä saatiin tuotettua 15 kW:n teho. Vuonna 2012 kehitystyön tuloksena rakennettiin prototyyppi, jolla kyettiin tuottamaan 7,5 MW. Vuonna 2013 yritys aloitti yhteistyön GE Marinen kanssa kehittääkseen laitteiston sopimaan myös laivakäyttöön. Laivakäyttöön suunnitelluilla laitteilla on kyetty tuottamaan noin 3 MW:n teho. Tällä sähköntuotantomäärällä on laitteisto kilpailukykyinen muita laitteita vastaan. (9)

Ollessaan nestemäisessä muodossa on hiilidioksidin lämpötila suuresti pakkasen puolella ja höyrystymislämpötila on 5,2 baarin paineessa  $-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tämä taas mahdollistaa höyryntuottamisen hyvin matalilla lämpötiloilla sekä konekuormilla. Valmistaja lupaakin sähköntuotantoa alkaen lämpötilasta  $204\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja ylärajan ollessa  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  (10).

Haittapuolena nestemäisen hiilidioksidin käytössä on sen alhainen lämpötila sekä kyky syrjäyttää happea. Alhainen lämpötila vaatii materiaaleilta enemmän kestävyyttä läpi lämpötila-alueiden. Hiilidioksidin ongelmana on se, mihin hiilidioksidi säiliö sijoitetaan. Paikan tulisi olla sellainen, että vuodon sattuessa siitä ei aiheutuisi vaaraa aluksen henkilökunnalle. Järjestelmän etuina on valmistajan mukaan kilpailukykyinen hinta verrattaessa perinteisiin vesihöyryjärjestelmiin, sekä alhaisemmat huoltokustannukset muihin verrattuna.

### 3.3.2 ORC (Organic Rankine Cycle)

ORC:n toimintaperiaate on täysin verrattavissa normaaliin höyryturbiinijärjestelmään. Eroavaisuutena on kuitenkin se, että väliaineena käytetään veden sijaan orgaanisia yhdisteitä, kuten esimerkiksi hiilivetyjä ja erilaisia öljyjä. Veteen verrattuna väliaineen ominaisuudet ovat parempia höyryntuotuksen kannalta, aineiden höyrystymislämpötilat ovat poikkeuksetta alhaisemmat kuin vedellä. Tällä saavutetaan se etu, että höyryä voidaan tuottaa alhaisemmilla lämpötiloilla ja näin saadaan oletusarvoisesti suurempi hyöty lämpöhäviöistä. (11)

Toistaiseksi ORC-järjestelmiä on käytetty lähinnä voimalaitosten yhteydessä, mutta valmistajat ovat ruvenneet kehittämään laitteistoja laivakäyttöönkin. Järjestelmiä on ollut koeajossa pienessä mittakaavassa ja niistä on saatu positiivista palautetta toimivuuden kannalta (12). Järjestelmät eivät vielä ole saavuttaneet suurta suosiota. Oletan kuitenkin, että laitteet tulevat yleistymään lähitulevaisuudessa.

Verrattaessa järjestelmää perinteiseen vesihöyryjärjestelmään, tulevat sen edut selkeimmin ilmi itse höyryntuotossa. Orgaaniset väliaineet eivät yleisesti tarvitse tulistusta ennen turbiinia, vaan väliaineet tulistuvat paisuessaan turbiinissa. Tyypillisesti väliaineiden entalpian muutos on pienempi verrattuna vesihöyryyn, tämä mahdollistaa yksivaiheisen turbiinin käytön. Yksivaiheinen turbiini on huomattavasti edukkaampi

kuin useampivaiheiset turbiinit. Joillain väliaineilla on myös mahdollista käyttää poltomootoreiden jäähdytysvesikiertoa sekä huuhteluilman jäähdytystä väliaineiden esilämmittämiseen. Öljyllä höyryn muodostuminen on verrattain hitaampaa kuin vedellä, näin ollen höyryn massavirta sekä painetaso ovat pienemmät, tämä taas johtaa siihen, että turbiini pyörii hitaammin. Öljyhöyry pienemmällä massavirrallaan myös kuluttaa vähemmän putkiston sisäpintaa, turbiinin siivekkeitä ja muita komponentteja.

Negatiivisena puolena järjestelmällä on käytettävien väliaineiden korkea hinta verrattuna veteen. Myös väliaineen täydennysmahdollisuudet liikennealueesta riippuen saattavat aiheuttaa ongelmia. Suurena haittapuolena on väliaineiden lämmönsietokyky. Tämä asettaa omat haasteensa siinä, kuinka lämpötilat saadaan pysymään riittävän alhaisina, jotta väliaine itsessään ei menetä ominaisuuksiaan liiallisen lämpenemisen takia. Osa kiertoaineista on myös hyvin haitallisia ihmisille ja vesieliöille, minkä takia täytyy kiertoaineen valintaan kiinnittää huomiota. Huomioitavaa on myös laitteen sijoittelu ja mahdolliset turvatoimet laitteessa tapahtuvan vuodon johdosta.

### 3.3.3 Kalina

Kalina-höyryjärjestelmää on yleisimmin käytetty voimalaitoksissa tuottamaan sähköenergiaa hukkalämmöstä. Perustoiminnaltaan järjestelmä vastaa suuresti vesihöyryjärjestelmää. Suurimpana erona on väliaineena käytetty vesi-ammoniakki-seos ja sen separointi höyryä lauhdutettaessa.

Kalina-höyryjärjestelmässä väliaineena käytetään vesi-ammoniakki-seosta, jossa ammoniakin osuus on yleisesti noin 70 prosenttia (13). Suuri ammoniakin määrä aiheuttaa haasteita höyryn lauhduttamisessa. Höyryn lauhdutus toteutetaan laimentamalla seosta lauhduttimen jälkeen olevalla separaattorilla. Separattorista lähtee kaksi ulostuloa, joista toinen kierrättää laimennettua seosta takaisin lauhduttimeen ja toinen ulostulo vie rikasta seosta takaisin normaaliin kiertoon. (14)

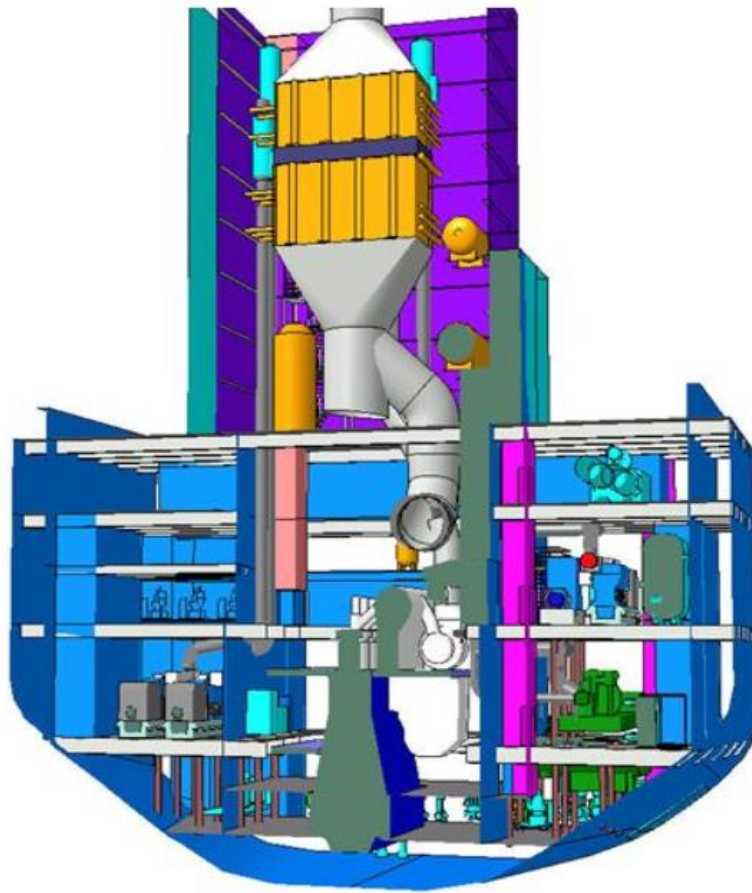
Vesi-ammoniakki-seoksella saavutetaan pelkkää vettä alhaisempi jäätymispiste sekä alhaisempi höyryämislämpötila. Tällä voi olla oma käyttönsä arktisiin olosuhteisiin suunniteltavissa laivoissa. Haittapuolena matalalla höyrystymislämmöllä on turbiinilta tulevan höyryn lauhduttaminen trooppisissa olosuhteissa, jolloin konehuoneen lämpötilat voi ylittää 50 °C ja merivedenkin lämpötila voi lähennellä 30 °C.

Negatiivisina puolina järjestelmässä on laitteiston monimutkaisuus verrattuna muihin järjestelmiin. Monimutkaisuudesta ja komponenttien määrästä johtuen on laitteisto yleisesti kalliimpi toteuttaa. Vesi-ammoniakki-seos on myös yksi järjestelmän haittapuolista ammoniakkin ollessa terveyttä vaarantava kemikaali.

### 3.4 Järjestelmien vaikutus aluksen vakavuuteen

Järjestelmän vaikutus aluksen vakavuuteen ei ole suuren kokoluokan aluksissa merkittävä vaikka järjestelmän yhteispaino saattaakin nousta yli 100 tonnin (6;15). Isoissa aluksissa tämä ei johda niin suuriin GM:n muutoksiin, että sillä olisi suurta negatiivista vaikutusta aluksen vakavuuteen. GM:llä tarkoitetaan aluksen kaikkien voimien yhteistä painopisteen G sekä aluksen metasentrin eli aluksen kelluvuuden kaarevuussäteen keskipisteen M välistä suhdetta. Lisääntynyt paino ei myöskään vaikuta hirvittävästi aluksen lastikapasiteettiin, vaikkakin se pienenee jonkin verran laitteiston myötä.

Pienemmissä aluksissa järjestelmien vaikutus aluksen vakavuuteen on jo paljon merkittävämpi laitteistojen painon vaihdellessa noin 50 tonnista yli 100 tonniin. Pakokaasuturbiinijärjestelmä on kevyin yksinkertaisimman rakenteensa ansiosta. Höyryturbiinijärjestelmä on jo hieman raskaampi, pakokaasu- ja höyryturbiini järjestelmän ollessa vaihtoehtoista raskain. Suurin yksittäinen vaikuttaja on pakokaasukattila, joka sijoitetaan aluksen korsteeniin. Tämä nostaa aluksen painopistettä ja pienentää aluksen GM:ää, jolloin alus muuttuu epävakaammaksi. Konehuoneen sijainnista sekä laivan korsteenin sijainnista riippuen saattaa aluksen painopiste muuttua myös pitkittäisessä sekä poikittaisessa suunnassa. Tätä voidaan kompensoida painolastilla sekä kuljetettavan lastin sijoittelulla. Aluksen lisääntyneen oman painon johdosta lastinkuljetus kapasiteetti pienenee pienissä aluksissa jo huomattavasti.



Kuva 5. Poikkileikkaus aluksen konehuoneesta WHRS järjestelmän kanssa (1)

## 4 LAITTEISTOJEN TOIMINTA JA KÄYTTÖ

### 4.1 Pakokaasuturbiini ja generaattori

Pakokaasuturbiinin toiminta on äkkiseltään mietittynä hyvinkin yksinkertainen. Pakokaasuturbiinissa turbiini saa liike-energiansa pakokaasujen virtauksesta. Pakokaasukanavaan asennetaan erillinen liityntäpiste, jonka kautta pakokaasuja johdetaan turbiinin siiville. Pakokaasun virtaus saa turbiinin pyörimään, turbiinipyörä on kiinnitetty akseliin, jonka toisessa päässä on alennusvaihte. Alennusvaihteen toiseen päähän kiinnitetään roottorin akseli. Akselin pyöriminen saa generaattorin roottorin pyörimään ja tuloksena on sähköä.

Turbiini kytkeytyy käyttöön, kun pääkoneen kuorma on noin 40 - 50 prosenttia, tämä taas tapahtuu avaamalla venttiiliä, joka on turbiinin tulolinjassa. Tätä toimintaa säätelee laitoksen kontrolloiysikkö. Kontrolloiysikön tehtävänä on anturien avulla säätää

turbiinin tuottamaa tehoa ja tarkkailla, että turbiininkäytöstä ei aiheudu mahdollisia vaaratilanteita pääkoneelle tai muille laitteistoille.

Järjestelmän avulla voidaan tuottaa sähköä muiden laitteiden rinnalla, mutta se asettaa suurempia vaatimuksia PMS-järjestelmille. Turbiinille pakokaasua ohjaavassa linjassa on antureita mittaamassa pakokaasun lämpötilaa sekä virtausta, myös turbiinin jälkeen on linjaan sijoitettu lämpötila- sekä virtausantureita. Antureilta saatua tietoa käytetään säätämään imupuolen venttiiliä, tämän venttiilin säädön avulla voidaan turbiinin tuottamaa tehoa säädellä. Pakokaasukanavaan tehdyllä linjauksella on varjopuolena, että linjauksen kautta virtaa pakokaasua sinne minne sitä ei normaalisti virtaisi. Tämän seurauksena ahtimen turbiinille menevän pakokaasun virtaus pienenee ja näin ollen turbiinin pyöriminenkin hidastuu ja sen seurauksena pääkoneen huuhteluilman saanti heikkenee. Ilman saannin pienentyessä pakokaasujen lämpötila nousee, kun sylinterissä tapahtuvaan palamiseen ei ole tarjolla optimaalista ilmamäärää. Pakokaasujen lämpötilan saavuttaessa ennalta asetetun maksimilämpötilan ohjausyksikkö säätää venttiiliä pienemmälle tai tarvittaessa sulkee venttiilin kokonaan.

Käytönaikaisena huoltona turbiinin tehdään märkä- ja kuivapesua. Muina huoltoina turbiinille tehdään laakereiden tarkastusta, turbiiniroottorin tarkistuksia, isompaa haa-lausta nelitahtikoneissa noin 12 000 – 18000 tunnin välein, sekä 2-tahtikoneissa noin 24 000 – 30 000 tunnin välein. Turbiinin pesu voidaan suorittaa märkäpesuna sekä kuivapesuna. Märkäpesussa koneen kuormaa täytyy laskea huomattavasti, mutta ei kuitenkaan niin alhaiseksi, että turbiini lakkaisi pyörimästä. Tällä pyritään välttämään mahdollisesti aiheutuvat vahingot, joita matalan lämpötilan tuottama lämpöshokki saattaisi aiheuttaa. Pesu suoritetaan mallikohtaisten ohjeiden mukaan esimerkiksi kymmenellä puolen minuutin suihkutuksella ja jokaisen suihkutuksen välillä pidetään minuutin tauko. Turbiinin tulolinjassa on pesuliitântä, ja kun vettä suihkutetaan linjaan hajottaa pakokaasun virtaus vesisuihkun pieniksi pisaroiksi ja levittää sen tasaisesti turbiinin siiville. Moni valmistaja suosittelee märkäpesun tehtäväksi noin 150 tunnin välein. (16.)

Kuivapesussa käytetään esimerkiksi pähkinänkuoria, pesussa käytettävä aines määrä vaihtelee turbiinin koon mukaan ollen yleisesti 0,1 – 0,5 litran välillä. Aineksen rae-koko tulisi valmistajasta riippuen olla välillä 1-1,5 millimetriä. Kuten märkäpesussa syötetään pähkinänkuoria tulolinjan liitännästä. Kuivapesussa koneen kuormalla ei ole

niin suurta merkitystä, sillä kuiva aines ei aiheuta vastaavaa lämpöshokkia kuin vesi. Kuivapesussa joudutaan käyttämään paineilmaan ajamaan pesuaines turbiinille, sillä turbiinin tuottama imu ei yksinään riitä imemään materiaalia. Kuiva-ainepesu tulisi suorittaa 24 tunnin välein. Pesua tehdessä on huomioitava, että kuivapesussa saattaa pakokaasukanavasta irrota suuriakin määriä nokea, rahtilaivalla tämä ei ole niin suuri ongelma kuin esimerkiksi matkustaja-aluksissa. Paras pesutulos saadaan yhdistämällä märkä- sekä kuivapesu.

Silmämääräistä tarkistusta sovelletaan laakereihin, pidätysrenkaaseen, turbiinin siivikkeisiin sekä suutinrenkaaseen. Tarkistuksia varten täytyy turbiinin ympäriltä poistaa sitä peittävät suojat sekä eristeet. Laakerit tulee tarkistaa silmämääräisesti mahdollisten kulumien vuoksi.

Helppo, mutta erittäin tärkeä tarkistuksen ja huollon kohde on turbiinin kiinnikkeet, mutterit, pultit ja pannat. Pultit ja pannat tapaavat löystyä käytönaikana ja ne tulisi tarkistaa noin 3000 tunnin välein. Mikäli turbiini on jouduttu irrottamaan kokonaan, tulisi kiinnikkeet tarkistaa 250 tunnin käytön jälkeen. (16.)

Turbiinin täyshaalauksessa poistetaan kaikki turbiinin ympärillä olevat suojat, turbiini irrotetaan ja viedään esimerkiksi verstaalle. Turbiinikokonaisuus puretaan niin, että jokainen sen sisältämä komponentti voidaan puhdistaa ja tarkistaa kulumien varalta. Kun turbiini on kasattu, tulee kaikki välykset tarkistaa. Väärät välykset saattavat johtaa turbiinin rikkoutumiseen, pahimmassa tapauksessa turbiini saattaa vahingoittaa ympärillään olevia laitteita, sillä turbiini kehittää pyöriessään suuret voimat ja kappaleilla voi olla tarpeeksi voimaa lävistääkseen turbiinipesän ja turbiinia ympäröivät suojat.

## 4.2 Höyryturbiini ja generaattori

Järjestelmässä tarvittavaa höyryä tuotetaan suljetussa järjestelmässä. Pakokaasuahtimen jälkeinen savukaasun lämpötila on noin 350 – 400 °C, joka on usein riittämätön tarvittavan höyrymäärän tuottamiseen sekä tulistamiseen. Tätä varten pakokaasukanaavaan on asennettava ohituslinja sekä venttiili, jolla saadaan johdettua pakokaasuja ahtimen ohitse. Tämän avulla saadaan pakokaasun lämpötilaa nostettua ahtimen jälkeen.

Pakokaasun lämpöenergialla muutetaan kiertoine höyryksi. Tämä tapahtuu korsteeniin asennettavalla pakokaasukattilalla. Kattilalle tuleva vesi tulee syöttövesisäiliöstä, josta sitä pumpataan syöttövesipumpulla. Turbiinikäytössä syöttöveden tulee olla äärimmäisen puhdasta, joten syöttövedettä tarkkaillaan erilaisin anturein. Puhtaan veden varmistamiseksi voidaan vettä tarvittaessa lisäaineistaa. Syöttövesisäiliölle tulisi suorittaa myös määräaikojen välisiä puhalluksia, joilla saadaan putkistosta mahdollisesti irronneita partikkeleita pois kierrosta. Yhdellä painetasolla toimivassa järjestelmässä vesi kiertää kattilan sisään kolmessa eri vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa syöttövedettä lämmitetään kattilan ylimmässä osassa olevalla lämmönvaihtimella, lämmityksen jälkeen vesi johdetaan höyrylieriöön. Lieriössä on samanaikaisesti sekä vettä että höyryä. Lieriöstä vettä johdetaan kattilaan kiertopumpun avulla, tällä kertaa höyrystimmelle, joka on noin kattilan puolivälissä korkeussuuntaisesti ajateltuna. Tässä vaiheessa kiertoine muuttuu höyryksi ja palaa takaisin lieriöön. Lieriössä olevaa höyryä johdetaan lämmittämään syöttövesisäiliötä. Lieriöstä höyry myös johdetaan tulistimille, joka on viimeinen vaihe ennen kuin höyry johdetaan turbiinille. Turbiinin jälkeen höyry lauhdutetaan vedeksi ja johdetaan takaisin syöttövesisäiliöön. (17;18)

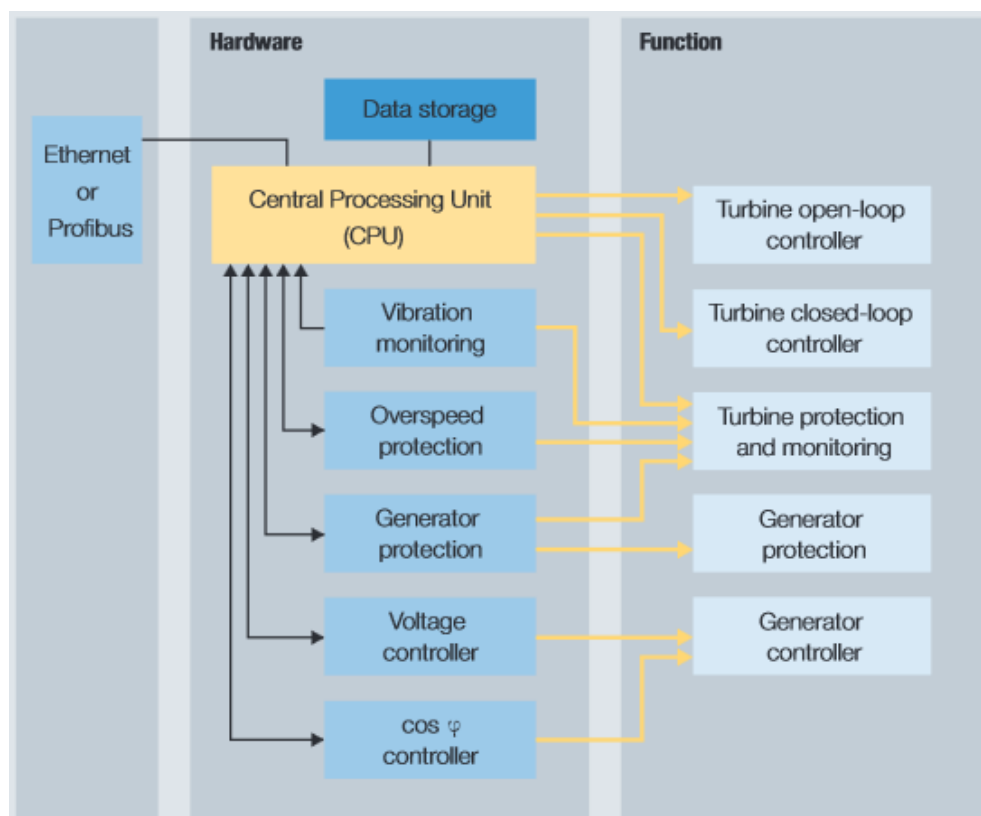
Pakokaasukanavaan sijoitetuilla lämpötila- sekä virtausantureilla tarkkaillaan pakokaasujen lämpötilaa ja virtausnopeutta korsteenissa. Kumpikaan näistä arvoista ei saa nousta ennalta määrätyn lämpötilan tai virtauksen yli tai laskea ennalta määriteltyjen arvojen alapuolelle. Näillä lämpötilan ja pakokaasun virtaustiedoilla ohjainyksikkö välittää tietoa säätölaitteelle. Kattilan höyryntuoton säätäminen on yleisesti vakiopaineen säätö. Säätötavalla pyritään pitämään kattilan tuottama höyrynpaine mahdollisimman tasaisena. Normaalkattilassa tämä tapahtuisi säätämällä polttoaineen syöttöä, pakokaasukattiloissa polttoaineensyötön sijaan säädetään pakokaasunlämpöä, joka tapahtuu säätämällä venttiiliä moottorin pakosarjan väliottolinjassa. Mitä enemmän lämpöä, sitä enemmän ja nopeammin tuottaa kattila höyryä ja toisinpäin mitä vähemmän lämpöä, sitä vähemmän ja hitaammin höyryä syntyy. Vakiopainesäädöllä on negatiivisena puolena hidas reagointiaika, joka saattaa johtaa ongelmatilanteisiin esimerkiksi black-out tilanteissa. Samalla kun ohjainyksikkö säätää väliottolinjassa olevaa venttiiliä, säätyy yleensä myös turbiinin tulolinjan venttiili. Venttiilin säädöllä pyritään pitämään myös turbiinille tuleva höyrynpaine tasaisena, tällä pyritään välttämään mahdollisia paineiskuja, jotka saattavat rikkoa turbiinin siipiä. (17;18)



Lämpötilan ja virtauksen tarkkailu on tärkeää myös sen takia, että kattilan putkiin ja savupiippuun alkaa muodostua nokea liian alhaisilla lämpötiloilla ja virtauksilla. Pakokaasukattilan lämmönvaihdingpinnoille kertynyt noki, kattilakivi tai muu lika heikentävät lämmönsiirtotehoa, mikä saattaa aiheuttaa turhaa lämmöstä johtuvaa rasiutusta, lämpörasitus voi rikkoa kattilan putkistorakenteita. Korsteenin sisäpinnoille kerääntynyt noki ja muu lika voivat aiheuttaa pahimmassa tapauksessa nokipalon, joka on äärimmäisen hankala sammutettava.

Nokea puhdistetaan korsteenista nuohoimilla, nuohoimia on muun muassa paineilmatoimisia, vesitoimisia sekä höyrytoimisia. Näissä järjestelmissä yleisin on höyryllä toimiva nuohoin. Höyrynuohoimen käytön etuina on se, että kattilalla tuotettua höyryä voidaan käyttää savupiipun pintojen nuohoamiseen ja tällä tavoin saadaan laitteisto pidettyä yksinkertaisena ja halpana. Yleisesti kattilan nuohous kuuluu jokapäiväisiin rutiinitoimiin, jos kattila ei pidä sisällään nuohousautomaatiikkaa. (18.)

Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu kaavion avulla turbiinin ja generaattorin ohjaus- ja valvonta logiikkaa. Keskimmäisessä sarakkeessa on valvontalaite ja oikean puoleisessa sarakkeessa on laitteen tehtävä järjestelmässä.



Kuva 6. Turbiinin sekä generaattorin ohjailulogiikka. (6)

### 4.3 Höyry- ja pakokaasuturbiini ja generaattori

Höyry- ja pakokaasuturbiinin sisältävä järjestelmä toimii höyryturbiinin ehdoilla. Järjestelmää ylös ajettaessa ensimmäisenä on höyryturbiinin vuoro. Turbiinia täytyy esilämmittää sekä pyörittää sillä ajanjaksolla, kun sen lävitse ei virtaa höyryä. Turbiinin ylös ajaminen alkaa, kun pääkoneen kuorma on n. 30 prosenttia. Turbiinin ylös ajo voidaan suorittaa joko manuaalisesti tai automaattisesti. Ylös ajo tapahtuu ohituslinjan venttiiliä säätämällä. Venttiili voidaan avata manuaalisesti tai automatiikan avulla. Automatiikassa venttiilin avaa toimilaite, jolle avaus käskyn antaa ohjausyksikkö. Venttiilin säätöä varten ohjausyksikkö kerää tietoa antureilta.. Venttiilin auettua nousee pakokaasun lämpötila pikkuhiljaa siihen pisteeseen, että höyryä voidaan tuottaa. Kun höyryn tuotto on tarpeeksi suuri turbiinin pyörittämiseen, avataan turbiinin tulolinjan venttiiliä portaittain. Turbiinin valmistaja antaa taulukon, jonka mukaan turbiinin kuormaa nostetaan, kuormaa tulee pitää ohjeiden mukaisella tasolla määrätyn ajan. Toimintatavalla pyritään varmistamaan turbiinin tasainen lämpeneminen ja näin välttämään turbiinin epätasaisesta lämpenemisestä johtuvat tilanteet, joissa turbiini voi vioittua. (17;18)

Pakokaasua johdetaan kattilaan ohjauskartion kautta, joka jakaa pakokaasunvirtauksen tasaisesti koko kattilan pinta-alalle. Ohjauskartion läpät ovat kiinteästi paikallaan olevia. Niiden suunnittelussa on käytetty usein käytetty CFD simulointia. Computational Fluid Dynamics, suomeksi numeerinen virtausdynamiikka. Numeerista virtausdynamiikkaa käytetään simuloinnissa kun tutkitaan nesteen tai kaasun käyttäytymistä. Tällä simulointitavalla pystytään määrittämään optimaaliset muodot ohjauskartion läpille, jotta pakokaasut jakautuvat tasaisesti läpi korsteenin virtaus pinta-alan. (1.)

Pakokaasuturbiinin tulolinjan venttiili aukeaa kun pääkoneen kuorma on n. 50 prosenttia. Tällä pyritään varmistamaan riittävä ahtimen kompressiopuolen toiminta. Pakokaasu- ja höyryturbiinien välillä on alennusvaihte, sillä niiden kierrosnopeuden synkronointi on erittäin haastavaa ja asia saadaan hoidettua helpommin sekä yksinkertaisemmin alennusvaihteen avulla. Pakokaasuturbiinin yhteydessä käytetään usein planeettavaihteistoa. Höyryturbiinin kanssa on järjestelmissä käytetty tehosta riippuen joko planeettavaihteistoa tai yksinkertaista kahden erikokoisen hammaspyörän vaihteistoa, jossa hammaspyörät ovat erikokoisia ja nuolihammastettuja. Nuolihammas-

tuksella vähennetään hammaspyörien aksiaalikuormaa, kuorman vähentäminen lisää vaihteiston kestävyyttä.

Ohjausjärjestelmän tehtävänä on pitää pakokaasun virtaus sekä lämpötila optimaalisena. Tämä tapahtuu linjoissa olevien lämpötila- sekä virtausantureiden avulla ja jatkuvalla tiedon tarkkailulla. Järjestelmään kuuluu myös paineantureita millä varmistetaan, että pakokaasukanavissa vastapaine ei pääse nousemaan liian korkealle.

Generaattoria pyöritetään alennusvaihteen avulla. Yleisimmin laitteisto on koottu seuraavaan järjestykseen: pakokaasuturbiini-alennusvaihde-höyryturbiini, jonka jälkeen alennusvaihteella pyöritetään generaattorin roottoria. Tällä kokoonpanolla voidaan tuottaa sähköä joko molemmilla turbiineilla, tai pelkästään höyryturbiinilla. Mikäli halutaan järjestelmä, jossa on vaihtoehtona tuottaa sähköä itsenäisesti vain toisella turbiineista, tulee generaattorin olla asennettuna turbiineiden väliin. Tällä asettelulla on mahdollista tuottaa sähköä vain pakokaasuturbiinilla. Järjestely on omiaan siinä tapauksessa, jos höyry- tai pakokaasuturbiinipuolella ilmenee ongelmia, jolloin viasta riippuen voidaan vika mahdollisesti korjata ajon aikana.

Järjestelmässä suositetaan yleisesti kahden painetason järjestelmää, koska kahdella painetasolla saadaan turbiinilla tuotettua enemmän sähkötehoa kustannusten noustessa marginaalisesti. Kahden painetason järjestelmä toimii pääpiirteittäin kuten yhden painetason järjestelmä ja suurimmat eroavaisuudet ovat pakokaasukattilassa, johon tulee kahdelle painetasolle omat höyrystimet ja tulistimet. Toinen suurempi eroavaisuus on turbiinissa, minkä tulee toimia kahdella painetasolla. Järjestelmä on mahdollista toteuttaa myös useammalla kuin kahdella painetasolla, tämä kuitenkin on hankalaa toteuttaa laivoilla laitekoon kasvaessa erittäin suureksi. Kahden painetason turbiinissa syötetään korkeapaineista höyryä turbiinin korkeapaineosaan, korkeapaineosan jälkeen höyrynpaine laskee ja laajentunut höyry johdetaan turbiinin matalapaineosaan. Tilanteessa, jossa ei pystytä tuottamaan höyryä kahdella painetasolla, on turbiinia mahdollista ajaa yhdelläkin painetasolla, joka kuitenkin vaikuttaa negatiivisesti tuotetun sähkötehon määrään. (18.)

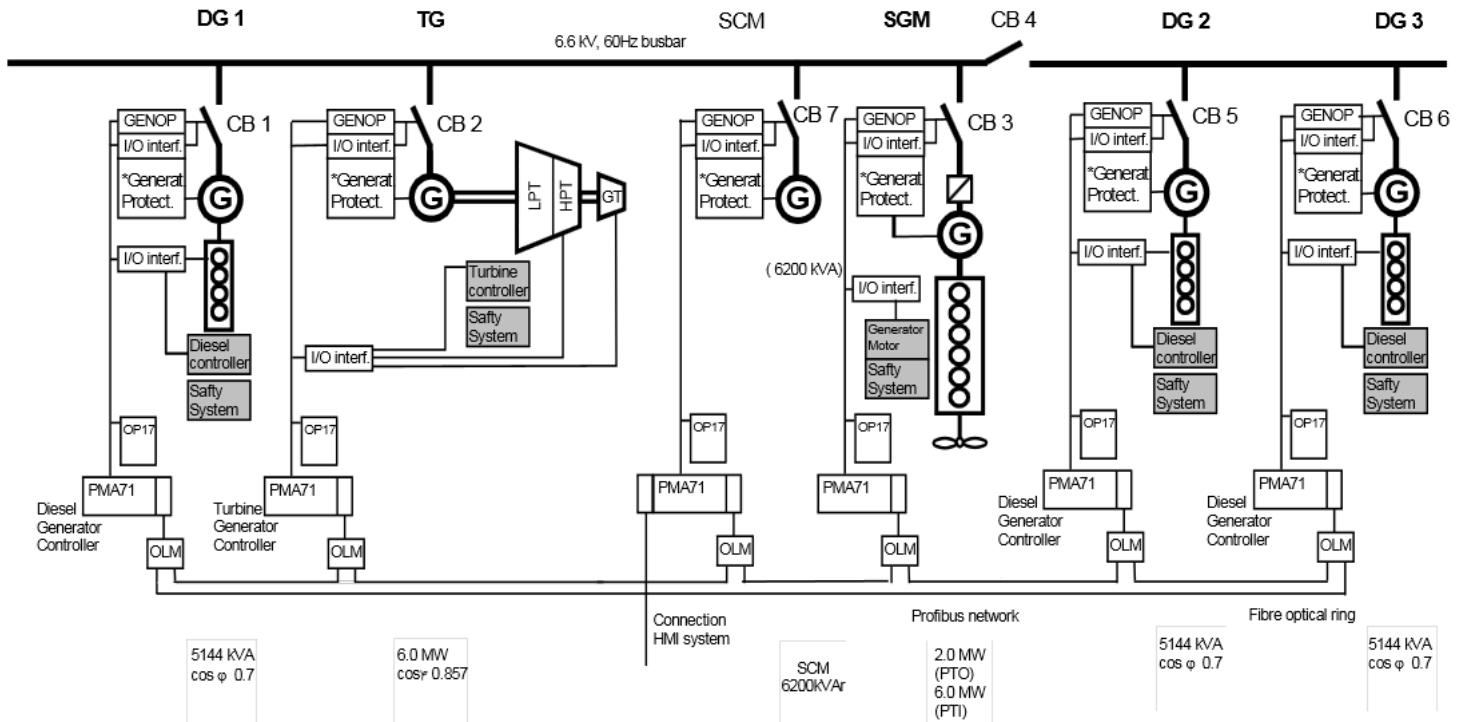
## 5 WHRS:SSÄ TUOTETTU SÄHKÖENERGIA

WHR-järjestelmässä sähköä tuotetaan kuten dieselgeneraattoreilla. Tarpeen mukaan voidaan tuottaa korkeajännitteistä sähköä, joka muutetaan muuntajilla pienjännitteiseksi kuluttajien tarpeiden mukaan. Laitekokonaisuuksien valmistajat suosittelevat priorisoimaan tarvittavaa sähköntuotantoa seuraavassa järjestyksessä: 1. WHRS 2. PTO 3. DG 4. PTI. Tällä priorisoinnilla pyritään pitämään aluksen polttoaineen kulu- tus mahdollisimman alhaalla. PTI moottori pidetään priorisoinnissa viimeisenä, sillä sen avulla voidaan lisätä aluksen propulsiotehoa jos WHR-järjestelmä tuottaa sähköä enemmän kuin käyttäjät tarvitsevat. (1.)

Turbiinien kanssa käytettävät generaattorit ovat vastaavia kuin mitä käytetään dieselgeneraattoreissa. Turbiinin akseli pyörii liian nopeasti, jotta roottori voitaisiin kytkeä suoraan turbiinin akselille. Jotta roottorille saadaan taattua optimaalinen pyörimisnopeus, pyöritetään staattoria alennusvaihteen kautta.

Generaattorilla tuotetun sähkön jännite riippuu aluksen sähköverkosta, esimerkiksi dieselsähköisen propulsio- omaavissa laivoissa voidaan sähköä tuottaa 6600 V jännitteellä ja muuntaa muuntajilla muille sähkölaitteille sopivaksi. Generaattorin tahdistus verkkoon tapahtuu säätämällä generaattorin taajuus lähelle verkon taajuutta. Kun generaattori on tahdistettu verkkoon, tulee sen tuottamaa tehoa lisätä, jotta generaattori ei mene takateholle. Kun generaattori on kytketty verkkoon, voidaan tarpeen vaatiessa rinnalla olevat apukoneet tai akseligenaattori ajaa alas. (18.)

Alla on esitettyä laivan sähköntuotannon single line-diagrammi, WHR-järjestelmä kytketään verkkoon generaattorikatkaisijoilla kuten aluksen dieselgeneraattoritkin.



Kuva 7. Sähköntuotto järjestelmien single-line diagrammi. (6)

## 6 LUOKITUSLAITOKSEN SÄÄNNÖKSET

WHRS-järjestelmälle itsessään ei ole asetettuja vaatimuksia luokituslaitoksen osalta, mutta laitteiston komponenteille on luokan sääntöjä. Säännöksiä alaisia laitteita ovat pakokaasukattila, kattilan suojalaitteet, pakokaasu- sekä höyryturbiinit ja niiden apulaitteet, generaattorit apulaitteineen sekä myös käytettävälle putkistolle ja venttiileille on luokituslaitoksen säännöksiä. Kaikkien säädösten lisääminen tähän työhön ei ole kannattavaa sillä sivumääräisenä se olisi lähemmäs sata sivua. Parempana vaihtoehtona olen listannut alle mistä osioista laitteita koskevat säännökset löytyvät. Esimerkkinä olen käyttänyt DNV:n julkaisuja, jotka ovat vapaasti luettavissa DNV:n sivuilta. (19.)

Pakokaasukattilaa koskevat säännökset löytyvät kappaleesta 6 Special Equipment and Systems – Additional Class Ch 34 sekä kappaleesta 7 Ships in Operation Ch 1.

Generaattoreita koskevat säädökset löytyvät osiosta 4 Machinery and Systems – Main Class Ch1 sekä Ch8.

Turbiineita koskevat säädökset löytyvät osiosta 4 Machinery and Systems – Main Class Ch 5

Putkistoja koskevat säädökset löytyvät osiosta 4 Machinery and Systems – Main Class Ch 6.

## 7 LAITTEIDEN VAIKUTUS LAIVAN TALOUDELLISUUTEEN

### 7.1 Polttoaineen kulutus

Järjestelmillä on vaikutusta polttoaineen kulutukseen. Vaikutus riippuu aluksen koosta sekä siihen asennetusta järjestelmästä. Vaikutus polttoaineen kulutukseen tulee siitä että laivan tarvitsemaa sähköenergiaa tuotetaan WHR-järjestelmillä dieselgeneraattoreiden sijaan. Polttoainetta kuluu siis vähemmän kun dieselgeneraattoreita ei tarvitse käyttää sähköntuotantoon yhtä paljon kuin aikaisemmin. Aluksen sähkötehon tarpeen ylittäessä WHR-järjestelmien tuottaman tehon on sähköä mahdollista tuottaa samanaikaisesti myös dieselgeneraattoreilla.

Laskelmieni esimerkkialuksena olen käyttänyt kuvitteellista konttilaivaa, jonka konttikapasiteetti on 18000 TEU, josta kylmäkonttikapasiteetti 600 TEU. Yksittäinen kylmäkontti, jonka lämpötila halutaan pitää -18 °C asteessa, tarvitsee noin 6,5 kWh sähkötehoa ylläpitääkseen lämpötilansa (20). Laiva ajaa taloudellisesti ja pitää pääkoneen kuorman 85 prosentissa. Aluksella on vuodessa 270 meripäivää ja loput päivät ovat seisontapäiviä.

Aluksen pääkoneena Wärtsilä-Sulzer RT-flex96C 14cyl. Konetehoa 80 080 kW, apukoneina 4 kpl Wärtsilä 6L26, yksi kone tuottaa sähkötehoa 2040 kW, yhteensä koneilla voidaan tuottaa 8 160 kW.

Aluksella käytettävä WHRS on kombinaatiolaitos, jossa kaksipaineinen höyryjärjestelmä. Järjestelmällä saadaan tuotettua sähkötehoa 8 – 11 % pääkoneen tehosta. (1.)

Laitteiston hinnat vaihtelevat aluksen pääkoneen mukaan. Kahdenpainetason höyry- ja pakokaasuturbiini järjestelmällä tulee valmistajasta riippuen hintaa noin 12 miljoonaa dollaria (6).

Polttoaineenkulutusta tutkittaessa täytyy ensin selvittää, kuinka paljon koneet kuluttavat polttoainetta. Polttoaineenkulutus löytyy useimmista manuaaleista, joita on tarjolla valmistajien kotisivuilla sekä laivoilta löytyvissä laitemanuaaleissa. Yleisesti ilmoitetaan, montako grammaa polttoainetta tarvitaan tuottamaan yksi kilowattitunti. Kulutuslukemat ovat yleensä moottorien koeajoissa saatuja, eri tehoilla mitattuja arvoja tehtaan penkissä. Moottoreiden kulutus laivoilla poikkeaa hieman penkissä saaduista arvoista. Alla olevaan taulukkoon on laskettu kuinka paljon polttoainetta kuluu tunnissa, tällä tiedolla on helppo jatkossa laskea päivittäinen sekä vuosittainen kulutus, kun tiedetään laivan ajopäivät ja seisontapäivät. Seisontapäivillä tarkoitetaan tässä työssä aikaa, jolloin alus on satamassa tai ankkuroituna. Laskelmissa käytetyt koneiden arvot on otettu Wärtsilän laitemanuaaleista.

Polttoaineen kulutus Wärtsilä-Sulzer RT-Flex 96C

Kuorma	Teho	g/kWh	kg/h	t/päivä
100	80080	172	13773,76	331
85	68068	168	11435,42	274
75	60060	167	10030,02	241
50	40040	168	6726,72	161

Seuraavassa taulukossa on teoreettiset optimikulutukset yleisille apukoneen kuormille.

Polttoaineen kulutus Wärtsilä 6L26

Kuorma	Teho kW	4 Konetta	g/kWh	kg/h	t/päivä 1kone	t/päivä 4konetta
100	2040	8160	187	381,48	9,15552	37
85	1734	6936	185	320,79	7,69896	31
75	1530	6120	189	289,17	6,94008	28
50	1020	4080	198	201,96	4,84704	19

Seuraavassa taulukossa on esitettyä jäähdytettävien konttien vaatima sähköteho sekä muiden kuluttajien vaatima sähköteho. Muiden kuluttajien sähköteho on suuntaa antava arvio. Jäähdytyskonttien sekä muiden kuluttajien vaatima sähköteho on se teho, joka tulisi kyetä tuottamaan WHRS-laitteistolla. Kyseisellä esimerkin WHRS-laitteistolla kyetään tuottamaan sähkötehoa välillä 6 400 kW – 8 808 kW.

Konttimäärä	Tarvittava teho [kW]	Teho muille kuluttajille	Tarvittava teho yhteensä
200	1300	2000	3300
400	2600	2000	4600
700	4550	2000	6550

Selvitetään paljonko on apukoneilla tuotettavan sähkön tarve. Tämän sähkötehon avulla voidaan laskea päivittäinen kulutus sekä vuosittainen kulutus. Alla arvot esitetään taulukoituna.

IFO 380	Pääkoneen kulutus		Apukoneiden kulutus	
Koneen tuottama teho	68068	kW	6650	kW
BSFC	168	g/kWh	185	g/kWh
Päivittäinen polttoaineen kulutus	274	tonnia	29,5	tonnia
Yhteenlaskettu kulutus päivässä	303,5			
Polttoainekulut päivässä	73750,5		7168,5	
Polttoainekulut vuodessa	\$ 19 912 635,00			
Polttoainekulut WHRS	\$ 17 977 140,00			
Vuosittainen säästö	\$ 1 935 495,00			

Huomataan, että tällä kokoonpanolla ja laivan käytöllä saavutetaan vuositason lähes kahden miljoonan dollarin säästöt, säästyneinä polttoainekuluina.

Laskelmissa ei ole huomioitu huoltokustannuksia eikä koneiden kuluttaman öljyn hintaa.



## 7.2 Päästöjen väheneminen sekä EEDI

Laivat tuottavat pakokaasupäästöinä suuria määriä hiilidioksidia, rikkidioksidia ja typpimonoksidia. Vuoden 2010 tilastojen mukaan laivat tuottivat vuodessa 3,29 miljoonaa tonnia rikkidioksidia ja 1,2 miljardia tonnia hiilidioksidia.

Esimerkkinä päästöjen vähenemisestä olen laskenut kohdan 7.1 arvoilla esimerkkialuksen CO<sub>2</sub>-päästöjen vähenemisen. Laskuissa ei ole huomioitu seisontapäiviä, vain pelkät ajopäivät on huomioitu, vuosittainen ajopäivien määrä on 270 päivää.

Polttoaine	Ominaispäästökerr oin g CO <sub>2</sub> /kWh	Ilman WHRS [t/d]	WHRs [t/d]	Ilman WHRS [T/a]	WHRs [T/a]	Muutos %
MGO	250	18,7	17,0	5043,5	4594,6	9,77
HFO	260	19,4	17,7	5245,2	4778,4	9,77

Vuosittaiset hiilidioksidipäästöt esimerkkialuksella laskevat 9,77 prosenttia eli noin 450tonnia.

Päästöjen väheneminen vaikuttaa myös aluksen EEDI:hin (Energy Efficiency Design Index) eli suomeksi energiatehokkuuden suunnitteluindeksi on kehitetty tukemaan ajatusmallia, jolla pyritään vähentämään laivojen kasvihuonepäästöjä. EEDI astui voimaan 2011 ja koskee vuoden 2011 jälkeen rakennettuja aluksia. EEDI:n jalanjäljissä tuli vuonna 2013 voimaan SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan), joka koskee kaikkia aluksia. SEEMP:iä en käsittele enempää työssäni.

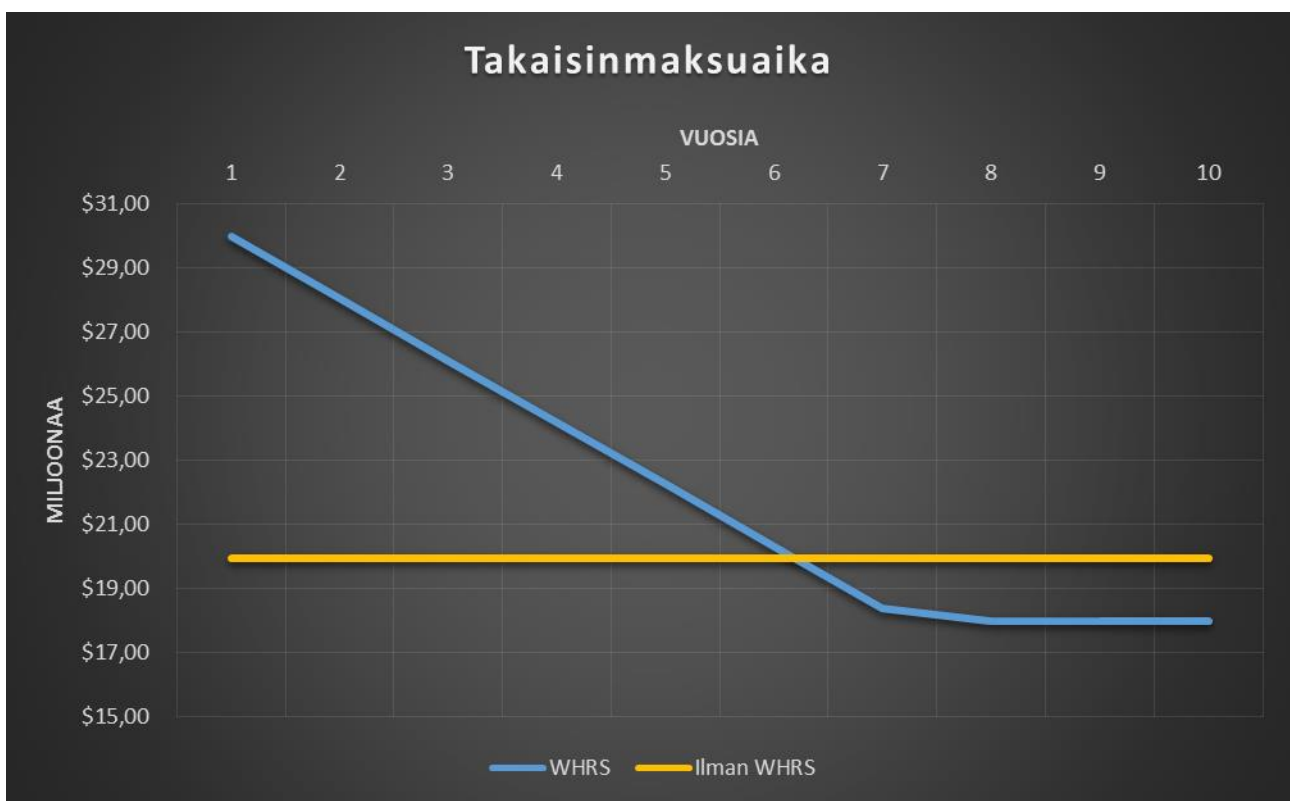
EEDI kuvaa aluksen kaikkien hiilidioksidipäästöjen suhdetta kuljetustyöhön. Kuljetustyö lasketaan kertomalla keskenään aluksen dwt, aluksen suunnitellulla nopeudella täydessä lastissa ja 75 % aluksen akselitehosta. Alustyypeille on säädetty erikseen minimivaatimukset EEDI:n suuruudelle. Mitä pienempi arvo, sitä energiatehokkaammin alus operoi.

WHRs-järjestelmällä saadaan vähennettyä aluksen hiilidioksidipäästöjä merkittävästi, joissain tapauksissa päästöjä on pystytty alentamaan yli 15 %. Näin suurella päästöjen alennuksella on positiivinen vaikutus EEDI:hin.

### 7.3 Takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuajassa on käytetty esimerkkinä polttoainesäästö-kappaleen esimerkkialusta.

Takaisinmaksuajan määrittäminen esittää omat haasteensa polttoaineen hinnanvaihtelun sekä laitekokonaisuuksien hinnan takia. Vaikuttavina tekijöinä ovat myös aluksen liikennealue sekä aluksen tyyppi, jotka osaltaan vaikuttavat laivan meri- sekä seisontapäiviin. Alla olevassa taulukossa on kuvattu takaisinmaksuaikaa, pystyakselilla on aluksen vuosittaiset operointikulut, vaaka-akselilla on vuosi.

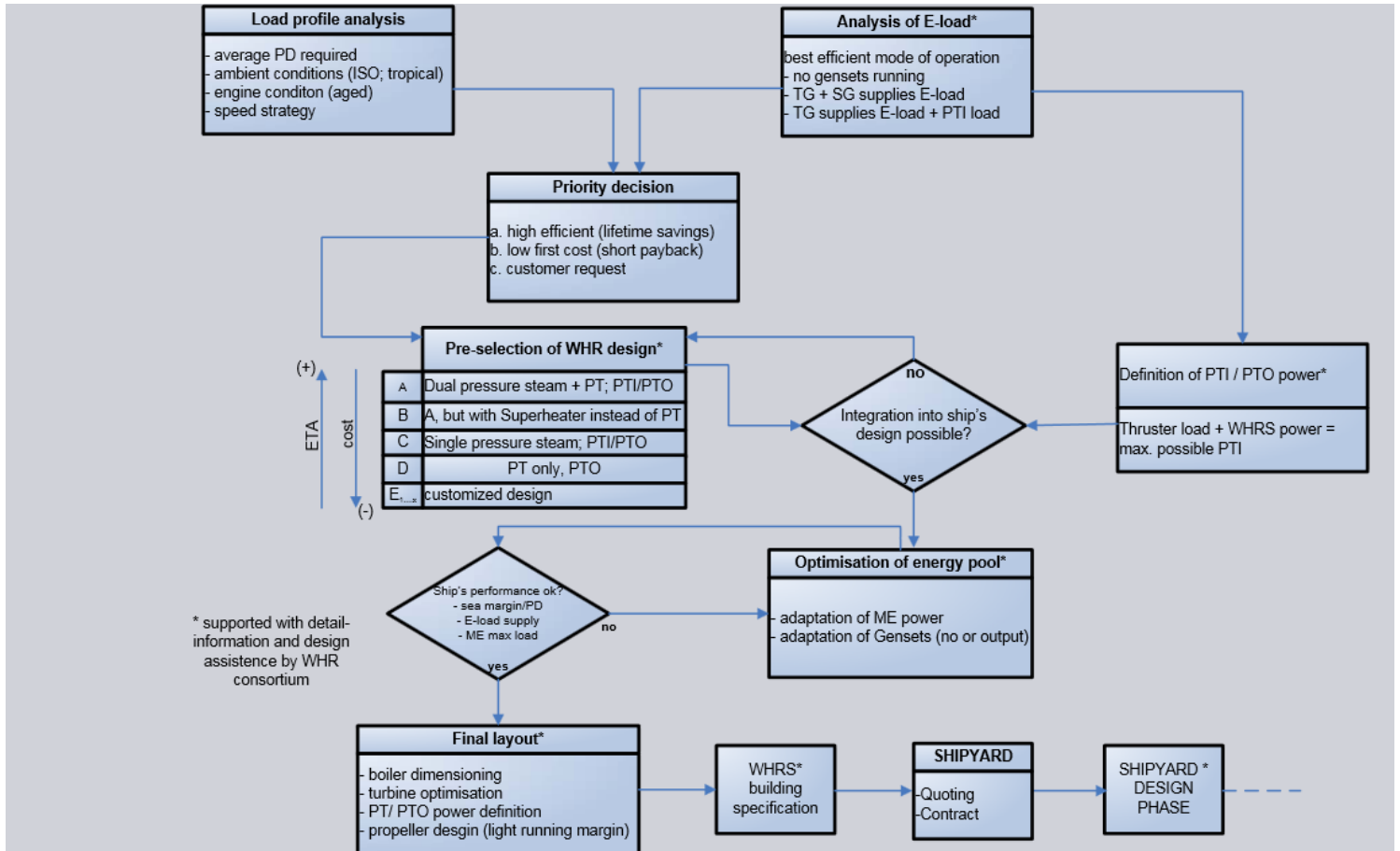


Takaisinmaksuajassa on ensimmäisen vuoden kohdalla otettu huomioon arvio laitteiden hankintakuluista sekä säästöistä.

Laitteistoista ei ollut saatavilla tarkkaa hintaa, joten olen laskenut järjestelmän hinnan erään valmistajan esitteen tiedoista (6). Tällöin kaksipaineisen höyry-pakokaasuturbiini-yhdistelmän hinnaksi saadaan noin 12,5 miljoonaa dollaria. Laskelmissa käytetty polttoaine on IFO 380 ja laskelmia tehdessäni oli sen keskimääräinen markkinahinta 243 dollaria/tonni. Polttoaineen hinnan ollessa 243 dollaria tonnilta tulee laitteen takaisinmaksuajaksi noin 5,8 vuotta.

## 8 SOVELTUVUUS ERI ALUSTYYPEILLE

### 8.1 Rahtilaivakäytössä



Kuva 8. Järjestelmien suunnittelussa apuna käytetty kaavio. (6)

Ylläolevaa kuvaa käytetään kun järjestelmän hankintaa alukselle ruvetaan suunnittelemaan. Laitevalmistajan ja varustamon yhteistyössä käydään lävitse aluksen tarve sähköntuotannolle. Kun sähkötehon tarve on selvitetty, ruvetaan järjestelmää suunnittelemaan yllä olevan kaavion avulla.

Järjestelmän soveltuvuus eri alustyypeille on riippuvainen aluksen sähköntuotannon tarpeesta, oletetusta liikennealueesta sekä aluksen konehuoneen tiloista. Järjestelmän asennusta on vaikea perustella lyhyenmatkan syöttöliikenteessä olevaan pieneen bulkkeriin kun taas toisessa ääripäässä on suuret konttilaivat sekä alukset, joissa tarvitaan paljon sähköntuotantoa erilaisista syistä johtuen.

Pienen kokoluokan aluksiin en henkilökohtaisesti näe järjestelmän jälki-asentamista taloudellisesti kannattavaksi, koska laitteisto tuskin tulee maksamaan itseään takaisin aluksen käyttöiän aikana. Ottakaamme myös huomioon pienien aluksien rajallisen tilan, jonka seurauksena järjestelmän asentaminen jälkikäteen saattaa osoittautua tilanpuutteen vuoksi mahdottomaksi.

Uudisrakennukseen järjestelmän sijoittamista voidaan pitää jo huomattavasti varteen otettavampana vaihtoehtona, koska asiat voidaan ottaa huomioon jo suunnittelu vaiheessa.

Keskikoon ja suurenluokan aluksissa järjestelmä saattaisi olla sovelias jälkiasennuskin, riippuen aluksen elinkaaresta. Aluksiin tehtäviä muutoksia saattaa olla helpompi toteuttaa, kun oletusarvona aluksilla on kohtuullisesti tilaa laitteistoille.

Järjestelmällä on mahdollista korvata yksi tai mahdollisesti useampikin laivan apukoneista riippuen siitä, paljonko asennetulla järjestelmällä saadaan tuotettua tehoa. Erään tanskalaisen varustamon suuret konttilaivat on varustettu WHRS-järjestelmällä ja niissä se onkin hyvin perusteltua. Suuren kokoluokan konttilaivoissa on usein kymmeniä, ellei jopa satoja kylmäkontteja, jotka vaativat paljon energiaa pystyäkseen ylläpitämään halutun lämpötilan. Tällöin on jo suunnitteluvaiheessa pystytty huomioimaan suuri sähkönkulutus ja WHRS-järjestelmän avulla on aluksella vaadittavaa apukonemäärää pystytty pienentämään, kun pitkillä merimatkoilla lähes kaikki laivan tarvitsema sähköenergia on pystytty tuottamaan WHRS- ja akseligeneraattorijärjestelmillä.

## 8.2 Matkustaja-aluskäytössä

Matkustaja-aluksia mietittäessä tulee monelle ensimmäisenä mieleen lyhyt risteily Ruotsiin taikka Viroon. Lyhyiden matkojen risteilijälle järjestelmien sovittaminen on haasteellista johtuen juurikin alusten lyhyistä merellä oloajoista. Kun mietitään, mikä järjestelmä voisi alukselle sopia, tulee ottaa huomioon, että höyrykattiloiden ylös ajaminen ei tapahdu aivan hetkessä. Höyrytoimisen järjestelmän haittapuolena tällaisissa tapauksissa on se, että kattiloiden ylös ajamiseen kuluu paljon aikaa ja sen tehollinen käyttöaika on hyvin pieni, sillä kattilat täytyy ajaa alas ennen seuraavaa satamaa ja lisäksi höyrykattiloita täytyy nuohota määrätyn väliajoin optimaalisen toiminnan var-

mistamiseksi. Nuohous taas saattaa johtaa siihen, että nuohouksen aikana voi aluksen korsteenista lentää matkustajien päälle korsteenista irtoavia noki- sekä muita jäämiä. Edellä mainituista syistä johtuen höyryjärjestelmät eivät sovellu hyvin kyseisille aluksille.

Pakokaasuturbiini + generaattori järjestelmä jää tämän tyyppisille aluksille ainoaksi potentiaalisesti vaihtoehdoksi. Ongelmia kuitenkin tuottaa laitteiston koko sekä matkustaja-aluksien konehuoneet, jotka tyypillisesti ovat hyvin matalia sekä ahtaita. Järjestelmälle saattaa siis olla hankalaa löytää sopivaa tilaa ilman konehuoneen yleisjärjestyksen muuttamista. Jos ja kun laitteistolle alukselta tilaa löytyy, tulee vielä laskelmoida syntykö laitteistolla tarpeeksi säästöjä asennuskulujen sekä aluksen jäljellä olevien käyttövuosien suhteen.

Toisessa ääripäässä ovatkin sitten valtameriristeilyissä käytetyt suuret risteilijät, joiden kulkemat matkat ovat parhaimmillaan tuhansia maileja satamien välillä. Tämän tyyppisillä aluksilla on suuri sähköntarve, tätä tarvetta tyydyttämään käytetään dieselgeneraattoreita. Dieselgeneraattoreiden korvaaminen WHRS-järjestelmällä saattaa olla alukselle taloudellisesti kannattavaa, mutta järjestelmillä on haittapuolensa. Kuten jo aiemmin mainitsin, alusten konehuoneet ovat ahtaita ja järjestelmille on vaikea löytää tilaa jälkiasennuksena. Käyttöprofiilinsa puolesta tämän kaltaisiin aluksiin voidaan harkita lähes jokaista WHRS vaihtoehtoa. Kynnyskysymyksinä onkin, millaisia ovat aluksen sähköntarve, konehuoneen tilat, aluksen jäljellä olevat seilausvuodet ja matkustajakapasiteetin pieneneminen.

Pitkänmatkan risteilijöissä höyry- ja pakokaasuturbiini + generaattori olisi sovelias vaihtoehto korvaamaan dieselgeneraattoreita. Haittapuolena laitteistolla kuitenkin on suuri koko ja jokapäiväisessä käytössä korsteenista tulevat noki sekä muut likapartikkelit, joita korsteeniin kerääntyy. Tämä taas voi johtaa siihen, että aluksen korsteenin ulostuloon tulisi tehdä muutoksia, jotta irtoavat partikkelit eivät sataisi ulkokansilla olevien matkustajien päälle aiheuttaen mielipahaa.

## 9 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää WHR-järjestelmien toimintaa sekä mitä kyseiset järjestelmät pitävät sisällään. Toisena tarkoituksena oli tuottaa järjestelmistä suomenkielistä tietoa sillä sitä on tällä hetkellä niukasti saatavilla.

Työssä käsittelin tällä hetkellä yleisimmin käytössä olevia järjestelmäkokonaisuuksia, mukaan otin myös muutaman kehitysasteella olevan sekä muutaman valmiin konseptin. Lähdemateriaalin hankinta tuotti muutamassa osiossa hankaluuksia. Kaiken kaikkiaan lähdemateriaalia löytyi hyvin, mutta lyhyen historiakatsauksen lähdemateriaaleissa oli kuitenkin eniten haastetta ja tietoja joutui etsimään haetuista sekä myönne-  
tyistä patenteista.

Keräämäni tiedon perusteella on johtopäätöksenäni, että hukkalämmön talteenottojärjestelmät tulevat yleistymään merenkulun piirissä. Järjestelmillä saavutetaan kannattavissa mittasuhteissa olevia säästöjä ja etenkin jos laivapolttoaineen hinta lähtee jyrkkään nousuun, on järjestelmien hankinta melko perusteltua jo pieniinkin aluksiin. Ei myöskään sovi unohtaa sitä, että järjestelmillä voidaan luoda varustamoille positiivista imagoa ympäristöystävällisyyden nimissä, laskevathan järjestelmät alusten tuottamia kasvihuonepäästöjä.

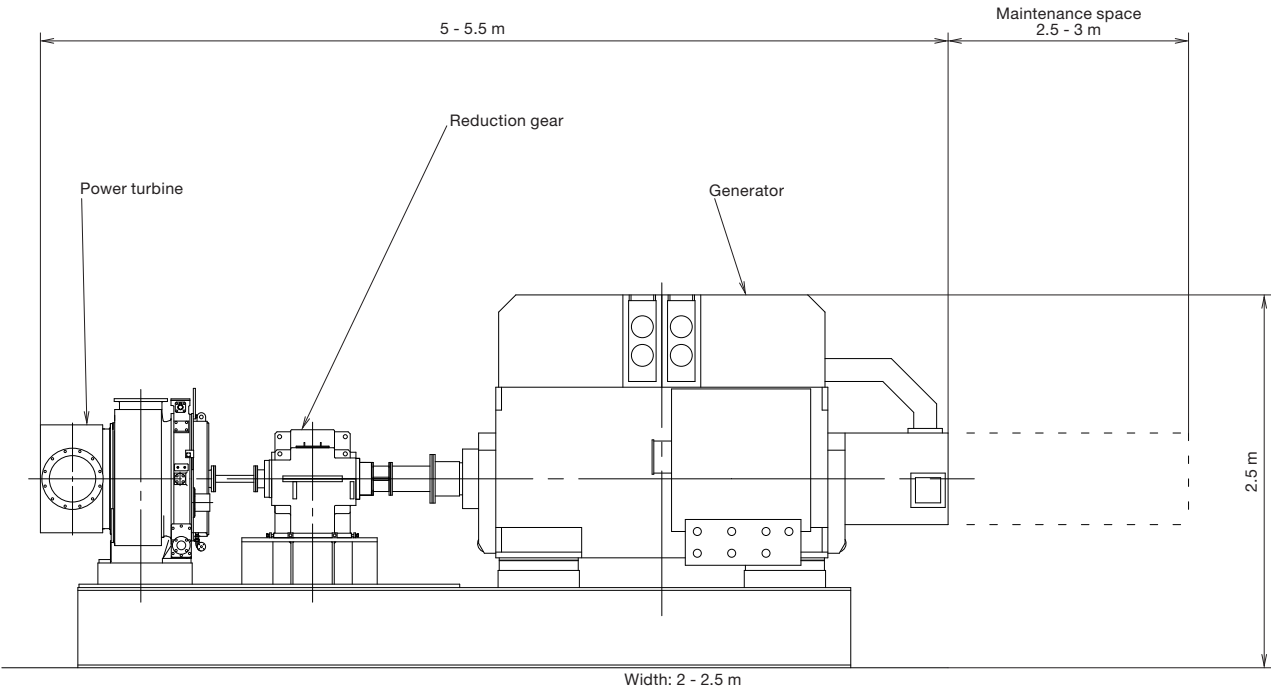
Työtä tehdessäni kertosin koulussa oppimia asioitani turbiini- ja kattilatekniikan saralta ja kertauksen lisäksi tuli työssä vastaan uusiakin asioita turbiineista sekä kattiloista. Kyseisiä järjestelmiä koskevaa opetusta voisi sisällyttää johonkin kurssiin, esimerkiksi turbiini- tai kattilatekniikan kurssiin.

## LÄHTEET

1. Man Diesel & Turbo. 2012. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI. Saatavissa: [http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/17740/5510-0136-00pp\\_low.pdf](http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/17740/5510-0136-00pp_low.pdf) [viitattu 4.1.2015]
2. Linn. M. 1933. Waste heat boiler heated by gases from diesel engines or the like. Saatavissa: <https://www.google.fi/patents/US1925646?dq=waste+heat+recovery+ship&hl=fi&sa=X&ei=RqXTVMGoEaaAzAPdqIDIBw&ved=0CB0Q6AEwAA> [viitattu 7.2.2015]
3. Grutzner. F. 1937. System for recovering and utilizing waste heat. Saatavissa: <https://www.google.fi/patents/US2208157?dq=waste+heat+recovery+ship&hl=fi&sa=X&ei=RqXTVMGoEaaAzAPdqIDIBw&ved=0CCYQ6AEwAQ> [viitattu 7.2.2015]
4. Grutzner. F. 1937 System for recovering and utilizing waste heat. Saatavissa: <https://www.google.fi/patents/US2208157?dq=waste+heat+recovery+ship&hl=fi&sa=X&ei=RqXTVMGoEaaAzAPdqIDIBw&ved=0CCYQ6AEwAQ> [viitattu 7.2.2015]
5. Pielstick. G. 1948. Propulsion power plant. Saatavissa: <https://www.google.fi/patents/US2602901?dq=gustav+pielstick+waste+heat&hl=fi&sa=X&ei=7dj1VKmqA-H9ygPAjoDYBA&ved=0CB0Q6AEwAA> [viitattu 7.2.2015]
6. Tigges. K. 2009. Energy saving potential in modern vessels. Saatavissa: <http://sg.siemens.com/is/is/Projects/Documents/Siemens%20WHRS%20topic.pdf> [viitattu 4.1.2015]
7. Ichiki. Y, Kanaboshi. T, Ohta. Y, Ono. Y, Shiraishi. K. 2011. Development of Super Waste-Heat Recovery System for Marine Diesel Engines. Saatavissa: <https://www.mhi-global.com/company/technology/review/pdf/e481/e481017.pdf> [viitattu 7.2.2015]
8. MAN Diesel & Turbo. MARC Steam Turbines, The modular concept Saatavissa: [http://turbomachinery.man.eu/docs/librariesprovider4/Turbomachinery\\_doc/marc-steam-turbines---the-modular-turbine-concept.pdf?sfvrsn=10](http://turbomachinery.man.eu/docs/librariesprovider4/Turbomachinery_doc/marc-steam-turbines---the-modular-turbine-concept.pdf?sfvrsn=10) [viitattu 19.1.2015]
9. Held. T. 2014. Initial test results of a megawatt-class supercritical co2 heat engine. Saatavissa: <http://www.swri.org/4org/d18/sco2/papers2014/testing/28-Held.pdf> [viitattu 15.1.2015]
10. GE Marine. Extra Power. Saatavissa: <http://www.geaviation.com/marine/systems/exhaust-energy-recovery/docs/echogen-datasheet.pdf> [viitattu 11.2.2015]
11. Turboden. The turboden orc. Saatavissa: <http://www.turboden.eu/en/rankine/rankine-turbodenorc.php> [viitattu 9.2.2015]
12. Opcon Marine. Commissioning and testing of first reference installation of Opcon technology for ships. Saatavissa: [http://www.opcon.se/web/First\\_installation\\_1\\_1.aspx](http://www.opcon.se/web/First_installation_1_1.aspx) [viitattu 1.2.2015]

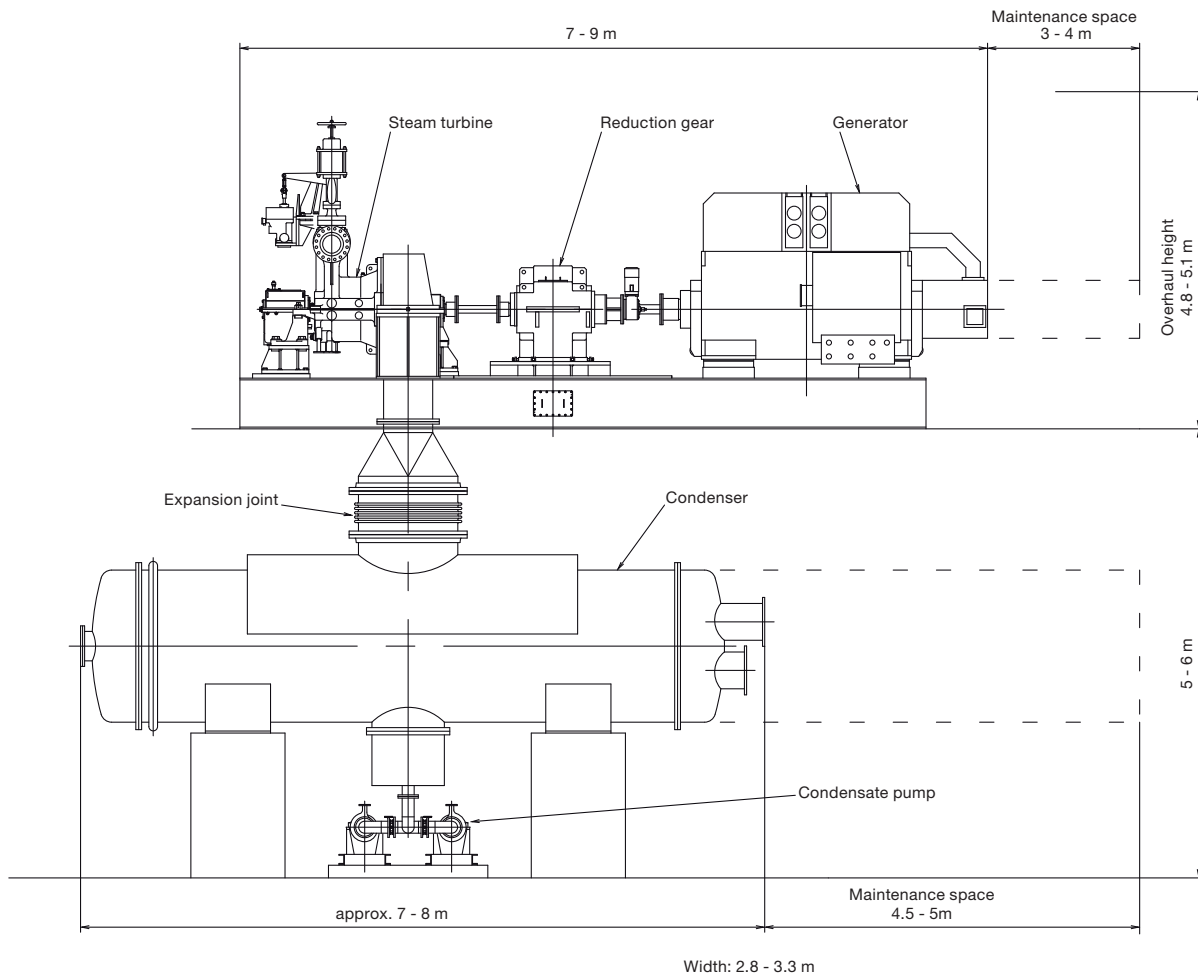
13. Paanu. T, Niemi. S, Rantanen. P. Waste Heat Recovery – Bottoming cycle alternatives. Saatavissa: [http://www.uva.fi/materiaali/pdf/isbn\\_978-952-476-389-9.pdf](http://www.uva.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-389-9.pdf) [Viitattu 6.2.2015]
14. Larsen. U, Nguyen. T-V, Knudsen. T, Haglind. F. System analysis and optimisation of a Kalina split-cycle for waste heat recovery on large marine diesel engines Saatavissa: [http://orbit.dtu.dk/ws/files/60269517/System\\_analysis\\_and\\_optimisation\\_postprint.pdf](http://orbit.dtu.dk/ws/files/60269517/System_analysis_and_optimisation_postprint.pdf) [viitattu 6.2.2015]
15. Mitsubishi Heavy Industries. Auxiliary Boilers. Saatavissa: [http://www.mhi-mme.com/products/boilerturbine/auxiliary\\_boilers.html](http://www.mhi-mme.com/products/boilerturbine/auxiliary_boilers.html) [viitattu 2.1.2015]
16. MAN Diesel & Turbo. TCR Project Guide, Exhaust gas turbocharger. Saatavissa: [http://turbocharger.man.eu/docs/librariesprovider9/turbocharger\\_doc/tcr-project-guide-exhaust-gas-turbocharger.pdf?sfvrsn=10](http://turbocharger.man.eu/docs/librariesprovider9/turbocharger_doc/tcr-project-guide-exhaust-gas-turbocharger.pdf?sfvrsn=10) [viitattu 19.1.2015]
17. Lajunen. M, 1978, Höyry ja kaasuturbiinit. Sivut 1-258
18. Huhtinen. M, Korhonen. R, Pimiä. T, Urpalainen. S. 2013 Voimalaitostekniikka. Sivut 109-129, 154-158, 299-303.
19. DNV service documents. Saatavissa: <https://exchange.dnv.com/servicedocuments/dnv> [viitattu 11.2.2015]
20. Wild. Y. Container handbook, German marine insurers. Saatavissa: [http://www.containerhandbuch.de/chb\\_e/wild/index.html?/chb\\_e/wild/wild\\_08\\_01\\_02.html](http://www.containerhandbuch.de/chb_e/wild/index.html?/chb_e/wild/wild_08_01_02.html) [viitattu 14.1.2015]





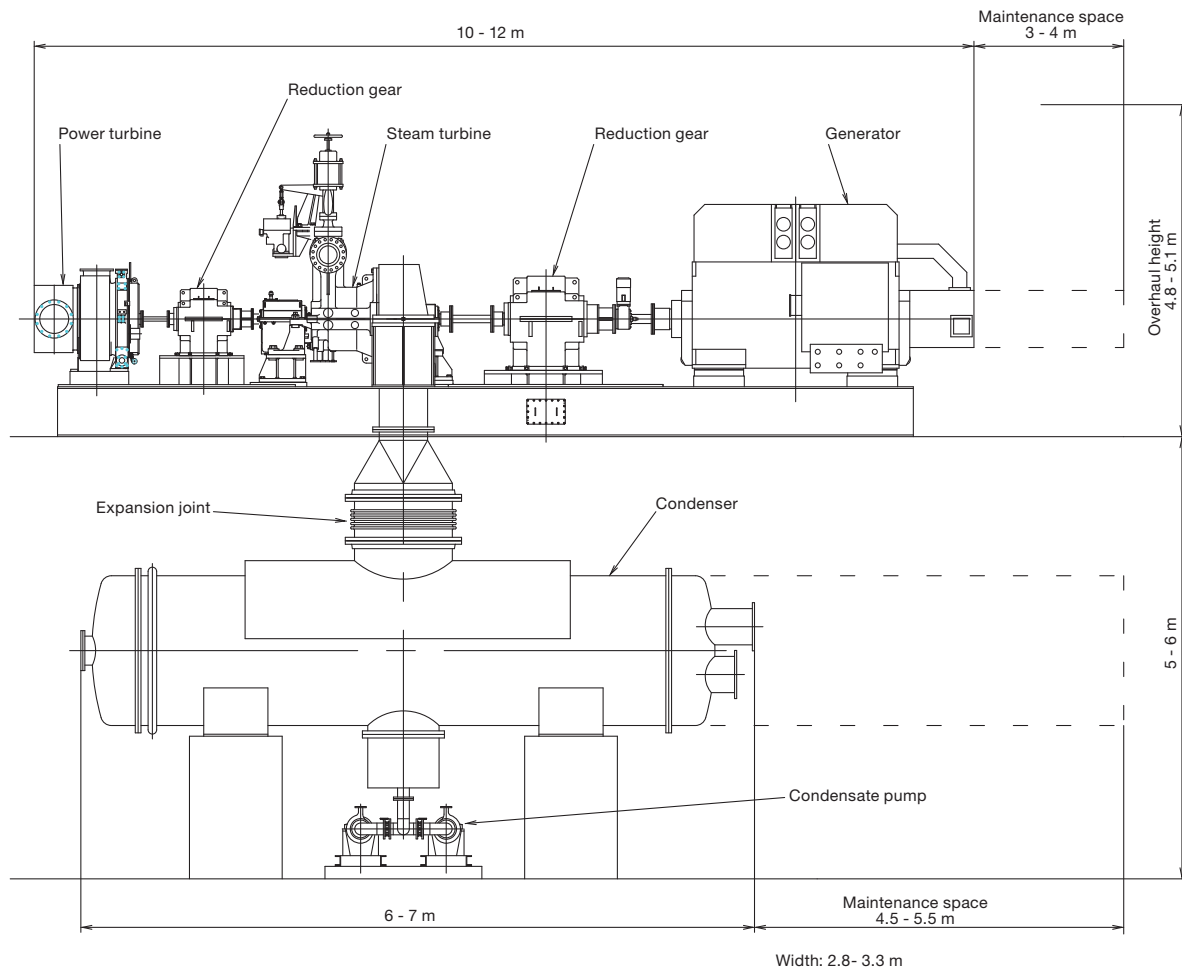
178 56 93-9.0

Fig. 4.05.02: The size of a 2,000 kW PTG system depending on the supplier



178 57 00-1.0

Fig. 4.05.04: Typical system size for 3.000 kW STG system



178 57 06-2.0

Fig. 4.05.06: Typical system size for 4,000 kW combined turbines